

**ESTUDIO DE MEZCLAS POROSAS MODIFICADAS CON FIBRA Y CAL
HIDRATADA MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO BASADO EN EL DISEÑO
DE EXPERIMENTOS (DOE)**

**NICOLÁS RODRÍGUEZ ROMERO
JENNY PAOLA ROMANO SANABRIA**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2019**

**ESTUDIO DE MEZCLAS POROSAS MODIFICADAS CON FIBRA Y CAL
HIDRATADA MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO BASADO EN EL DISEÑO
DE EXPERIMENTOS (DOE)**

**NICOLAS RODRIGUEZ ROMERO
JENNY PAOLA ROMANO SANABRIA**

Trabajo de grado para obtener el título de ingeniero(a) Civil.

**Docente director
Juan Carlos Ruge Cárdenas
Ingeniero Civil**

**Asesor externo
Carlos José Slebi Acevedo
Ingeniero Civil.**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2019**



Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Compartir bajo la Misma Licencia — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma presidente del Jurado

Firma de Jurado

Firma de Jurado

Bogotá D.C., Noviembre de 2019.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado, a todas las personas que me acompañaron desde principio a fin en este proceso. En especial a mi familia quienes fueron pilar fundamental en mi proceso académico, con la motivación continua semestre a semestre hasta llegar a este punto, A mis hermanos José y Danilo Romano quien han confiado en cada una de mis capacidades y me han brindado su apoyo en los momentos más dificultosos de la carrera. Y a mi Madre Gloria Sanabria, por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional.

Jenny Paola Romano Sanabria.

Esta tesis se la dedico principalmente a mis padres quienes con su amor y sacrificios me han brindado su total respaldo y apoyo para cumplir este sueño, quienes, inculcando en mí, valores y principios que me permitieron cumplir metas como la que hoy estoy logrando. Agradezco a mis profesores por compartir sus conocimientos los cuales me han permitido ser un profesional integral, al Ingeniero Carlos Slebi quien ha guiado nuestro proyecto de investigación con paciencia y rectitud.

Nicolás Rodríguez Romero

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer de manera especial a cada una de las personas que hicieron posible la investigación y el desarrollo de este proyecto, desde nuestras familias que nos han permitido llegar a este punto mediante mensajes de aliento, apoyo y perseverancia. En segundo lugar, agradecemos a los compañeros de la universidad Católica que de una u otra forma nos ayudaron de manera desinteresada, gracias por su ayuda y buena voluntad

A la institución, la Universidad Católica de Colombia por ser el Pilar de todo el conocimiento adquirido a lo largo de estos 5 años de carrera.

A los laboratoristas de la Universidad Católica, en especial al señor Hugo Quintana, que sus años de experiencia fortaleció de manera constante el desarrollo de casa unas de las prácticas.

Finalmente, a nuestro director de proyecto Ing. Juan Carlos Ruge y nuestro asesor externo el Ing. Carlos José Slebi, quienes fundamentaron y consolidaron nuestras ideas con su conocimiento y experiencia, por su constante motivación personal y profesional gracias.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	12
2.	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	13
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
4.	MARCO DE REFERENCIA.....	16
4.1.	MARCO TEÓRICO	16
4.2.	MARCO CONCEPTUAL.....	28
4.3.	MARCO LEGAL.....	29
4.4.	ESTADO DEL ARTE	30
5.	OBJETIVOS	33
5.1.	GENERAL	33
5.2.	ESPECÍFICOS	33
6.	ALCANCES Y LIMITACIONES	34
7.	MATERIALES Y METODOLOGÍA	35
7.1.	MATERIALES.....	35
7.2.	PREPARACIÓN DE ESPECÍMEN.....	37
7.3.	ETIQUETA DE PROBETAS	49
7.4.	ENSAYOS REALIZADOS SOBRE LAS BRIQUETAS.....	51
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	58
8.1.	ENSAYOS DE CRACTERIZACIÓN.....	58
8.2.	ENSAYOS DE ESTABILIDAD, FUNCIONALIDAD Y COMPORTAMIENTO MECÁNICO	60
9.	CONCLUSIONES	70
10.	REFERENCIAS.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cuadro Comparativo. Variables entre Tipos de Mezclas Asfálticas.	17
Tabla 2. <i>Requerimiento para el cemento Asfáltico en MD.</i>	19
Tabla 3 Requerimiento de Cemento Asfaltico MDr15.....	20
Tabla 4. <i>Granulometría Mezclas MD y MDr15</i>	21
Tabla 5. <i>Caracterizacion de los Agregados Mezclas drenantes.</i>	21
Tabla 6 <i>Caracterización de los Agregados Mezclas drenantes.</i>	22
Tabla 7. Matriz con las combinaciones y número de Pruebas	26
Tabla 8. Razones S/N para los diferentes tipos de variables de respuesta.....	26
Tabla 9 Tabla de ANOVA.....	27
Tabla 10. Normativa de Ensayos.	29
Tabla 11. Especificaciones Asfalto 60/70	35
Tabla 12 Técnica Fibras de Nylon	36
Tabla 13 <i>Ficha Técnica- Cal hidratada Calco.</i>	36
Tabla 14 Granulometría.....	42
Tabla 15. Resumen Factores de Control.....	43
Tabla 16: <i>Plan experimental.</i>	43
Tabla 17. Arreglo $L_9(3^{4-2})$	44
Tabla 18. Contenido de Betún-Fibras-Cal hidratada.	45
Tabla 19 Dosificación Diseños 1-2-3.....	50
Tabla 20 Dosificación Diseños 4-5-6.....	51
Tabla 21 <i>Dosificación Diseños 7-8-9.</i>	51
Tabla 22. <i>Resultados ensayo Gravedad específica y Absorción.</i>	58
Tabla 23. Resultado ensayo Porcentaje de Caras Fracturadas	58
Tabla 24. <i>Resultados del ensayo de Desgaste.</i>	59
Tabla 25. Resultados Gravedad específica en finos.....	59
Tabla 26. Resultados Ensayo Equivalente de Arena.....	59
Tabla 27 Turkey Test- Vacíos de Aire Totales	62
Tabla 28. Análisis de Varianza.	63
Tabla 29 Resumen resultados de SD y mean -ensayos de funcionalidad.....	68
Tabla 30 Resumen resultados de S/N y mean- ensayos de comportamiento mecánico.	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1 Perfil típico estructura de un Pavimento Flexible.....	16
Figura. 2 Proceso de Fabricación del asfalto-caucho (vía húmeda)	18
Figura. 3 Ejemplo de factores y variables en la fabricación de un envase de plástico.....	24
Figura. 4. Aditivos: Cal hidratada y Fibras de Nailon	37
Figura. 5. Proceso de separación agregado grueso del fino.....	38
Figura. 6 Identificación de Caras Fracturadas y No fracturadas. TM;1/2".	39
Figura. 7 Identificación de Caras Fracturadas y No fracturadas. TM;3/4".	39
Figura. 8 Identificación de Caras Fracturadas y No fracturadas. TM;3/8".	39
Figura. 9. Proceso de Sedimentación.	40
Figura. 10 Dispositivo para tomar lecturas.....	40
Figura. 11 Prueba Cono de Arena.	41
Figura.12 Organización de Tamices.	46
Figura. 13 Preparación granulometría del diseño.	46
Figura. 14 Medida de Cal Hidratada del diseño 7	46
Figura. 15. Medida de Fibras de Nailon.	47
Figura. 16 Adición de Ligante a la dosificación de agregados pétreos.	47
Figura. 17 Proceso de Mezclado.	48
Figura. 18 Revisión de Temperatura de Mezclado.....	48
Figura. 19 Vertimiento de Mezcla al Molde	49
Figura. 20. Etiquetas Probetas Diseños 1-2-3	50
Figura. 21 Etiqueta Probetas diseños 4-5-6.....	50
Figura. 22 Etiqueta Probetas diseños 7-8-9.....	51
Figura. 23 Peso Probeta después de ensayo Cántabro.....	52
Figura. 24 Probetas en Baño de maría a 60°C	53
Figura. 25 (b)Probetas después de 24 h sumergidas	53
Figura. 26 (a)Verificación de temperatura para sacar probetas	53
Figura. 27 Probeta en proceso de Saturación.....	54
Figura. 28 Medición Masa Probeta Sumergida	54
Figura. 29 Montaje probeta en Molde.	55
Figura. 30 Montaje permeámetro.	55
Figura. 31 Permeámetro con Agua	55
Figura. 32 Medición Baker+ Mezcla.....	56
Figura. 33 Medición Masa de Baker vacío	56
Figura. 34 Baker invertido	57
Figura. 35 Resultado Final Ensayo Escurrimiento.	57
Figura. 36 Escurrimiento Diseños 4 al 9	60
Figura. 37. Vacíos totales e interconectados	61
Figura. 38. Permeabilidad	61
Figura. 39 Efectos para las variables S/ N en Vacíos totales.....	64
Figura. 40 Efectos para las variables S/N en Vacíos interconectados.....	64

Figura. 41 Efectos para las variables S/ N en permeabilidad.....	65
Figura. 42 Pobreta después del ensayo de cántabro.....	67
Figura. 43 Porcentaje de pérdidas en condiciones húmedas y secas de cada diseño.	65
Figura. 44 Efectos para las variables S/ N en condición seca.	66
Figura. 45 Efectos para las variables S/ N en condición húmeda.	66

RESÚMEN

En la siguiente investigación se evidencia el desarrollo de mezclas drenantes o mezclas porosas como son denominadas en Europa, con el fin de implementar nuevos materiales para su mejoramiento en términos de estabilidad, comportamiento mecánico y funcionalidad. Para esto, se tuvieron en cuenta los ensayos más representativos para conocer el porcentaje de vacíos totales e interconectados, el escurrimiento, la permeabilidad, y la pérdida de partículas con el ensayo más relevante en esta investigación el cántabro en condiciones secas y húmedas. Adicionalmente, la evaluación de resultados se da a partir del diseño de experimentos (DOE), en este caso en específico el método Taguchi, que se caracteriza por la implementación de arreglos ortogonales (AO), para esta investigación se implementó un AO tipo L9, seguido un análisis de varianza, desviación estándar y señales de ruido.

ABSTRACT

The following research shows the development of draining mixtures or porous mixtures as they are known in Europe, to implement new materials to improve stability, mechanical behavior and functionality.

For this, the most representative tests were taken into account to know the percentage of total and interconnected voids, runoff, permeability and loss particles from one of the most relevant tests such as Cantabro in dry and wet conditions.

In addition, the evaluation of results is made from the design of experiments (DOE), in this specific case the Taguchi method, which is characterized by the implementation of orthogonal arrangements. For this research, we implemented an orthogonal arrangement of type L9 followed by an analysis of variance, standard deviation and noise signals.

1. INTRODUCCIÓN

Comúnmente las mezclas asfálticas densas son las más utilizadas en la elaboración del pavimento, ya que posee un excelente comportamiento ante sollicitaciones de servicio cuando se diseña correctamente. Sin embargo, se ha evidenciado ciertas problemáticas, ya que al ser impermeable genera láminas de agua superficiales lo que aumenta el riesgo del efecto de hidroneo el cual consiste en la pérdida de tracción y control del vehículo por el paso de una superficie húmeda a altas velocidades (Campos 2008).

La implementación de mezclas asfálticas drenantes se han convertido en una alternativa eco amigable y resiliente; proporciona beneficios como la *mitigación del ruido* generado por el contacto de neumático con la superficie, el cual es mayor cuando la superficie se encuentra húmeda, *mejora la fricción*, debido a su alta porosidad crea una textura superficial rugosa para evitar deslizamientos, *reduce las salpicaduras* pues por su gran porcentaje de vacíos permite una rápida filtración del agua y por último *contribuye al medio ambiente* (Król, Khan y Collop 2018). No obstante, estas ventajas entran en conflicto con las mezclas asfálticas densas en aspectos relacionados con el desempeño mecánico y la durabilidad. Por ejemplo, el desprendimiento de partículas fenómeno que suele presentarse en la mezcla asfáltica porosa debido al paso de los vehículos, es considerado como el principal problema de este tipo de mezclas asfálticas. (Xu et al. 2018)

Con el objeto de aumentar la durabilidad de las mezclas drenantes, diferentes aditivos pueden ser empleados. La cal hidratada, se acerca con resultados muy favorables, revelando características químicas propias de la roca caliza, que disminuye de manera significativa el fenómeno de *stripping* (Ameri et al. 2018b), el cual consta de la pérdida de adhesión generado por la humedad (Mehra y Khodaii 2013). Por otro lado, el uso de fibras en el asfalto ha permitido un efecto estabilizante en el asfalto, permitiendo incrementar su contenido. Lo anterior Similarmente las fibras en mezclas asfálticas permiten soportar los esfuerzos de tracción que se generan dentro de la mezcla y por ende aumentar la resistencia de las propiedades mecánicas (Slebi y Lastra 2019).

Con lo expuesto hasta aquí, este proyecto abarcará la investigación del comportamiento de mezclas asfálticas porosas desde el punto de vista funcional y mecánico, agregando materiales como las fibras de nylon y la cal hidratada. En esta investigación, se evaluarán diferentes dosificaciones y diferentes respuestas frente a ensayos de control desde el punto de vista de durabilidad y funcionalidad. Además, se analizará mediante métodos estadísticos, la confiabilidad y predicción de los resultados con base al diseño de experimentos según la metodología Taguchi.

2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El paso del concepto de mezclas asfálticas densas a mezclas asfálticas porosas ha sido implementado e investigado por países como: España, Bélgica y países bajos. Por ejemplo, este último, en especial Holanda tuvo un gran crecimiento en la construcción de autopistas en el período 1960 a 1985, particularmente en 1972 se empieza investigar e implementar las mezclas asfálticas porosas resaltando el gran potencial para mejorar aspectos de seguridad, ruido y confort. (Van der Zwan et al. 1990).

En Bélgica experimentan sobre las mezclas porosas en 1979 con un trabajo de 27.000 m² que constaba de 2 carriles con un volumen de tráfico de 700 vehículos, al igual que Holanda indico inmediatamente los beneficios que tendría en la utilización de dichas mezclas. Pasaron unos años para desarrollar mejor la técnica y en 1981 hasta 1988 se adelantaron 70 trabajos que constaron de 2 millones de m². (Van Heystraeten y Moraux 1990). Paralelo se encontraba España desarrollando 4 vías experimentales, con una extensión de 44 Km, las primeras mezclas fueron conservadoras en cuanto a la relación de vacíos, usando solo el 15%, aun así, se obtuvieron resultados favorables que llevaron ampliar su uso hacia los años de 1986. En España se resaltó que después del uso de 9 años el pavimento ha mantenido su capacidad de drenaje, como tampoco se demostró un deterioro grave. (Ruiz, Alberola y Sánchez 1990)

Sin embargo, Holanda involucró el tema económico pues la vida útil era más corta y el mantenimiento que se requería era más costoso, además se dieron cuenta que se necesitaría una construcción del asfalto más gruesa de 4 cm para proporcionar las capacidades de soporte necesaria (Van der Zwan et al. 1990). Por tal motivo el costo beneficio asociado con las mezclas drenantes podría ser justificado, no obstante, en el transcurso de los años se ha trabajado en las deficiencias que este posee para corregirlas mediante la incorporación de nuevos aditivos.

De acuerdo con lo anterior una alternativa es el uso de fibras, las cuales incorporadas en cantidades apropiadas presentan un gran potencial para la mitigación de las problemáticas típicas de las mezclas drenantes, entre ellas, mejorar la sensibilidad al agua, la resistencia a la *raveling*, la ductilidad, sin comprometer el drenaje, entre otras. La investigación sobre el uso de las fibras se remonta a 1950 en hormigón asfáltico (Slebi y Lastra 2019); al ser más común su uso, se ha empezado a estudiar acerca de los tipos de fibra y su respectivo comportamiento en contraste con las mezclas convencionales drenantes, por ejemplo, se han estudiado las fibras celulósicas, fibras de poliéster, fibras de lignina, fibras de asbestos y demás. Donde las mezclas asfálticas que contienen fibras celulósicas poseen mejor resistencia al escurrimiento, como también ayuda que el daño inducido por el agua sea menor, debido a que el uso de este polímero espesa la película de asfalto en el agregado y por lo tanto mejora la resistencia al daño. No obstante, el uso único de fibras de celulósicas presentan el mismo porcentaje de pérdida por abrasión. (Liu et al. 2006).

Por otra parte, la cal hidratada se hace interesante en Estados Unidos en los años 70's por su efecto beneficioso sobre el daño por humedad y la resistencia a las heladas. Sin embargo, resultó que la cal hidratada también mejoró otras propiedades, considerándolo ahora como un aditivo multifuncional que mejora la durabilidad de las mezclas asfálticas (Lesueur, Petit y Ritter 2013). Estudios evalúan el aglomerante modificado con polímeros, como cal hidratada y polvo de piedra caliza, los resultados son favorables en la reducción de la susceptibilidad al agua, menor porcentaje de abrasión y un aumento en la resistencia a la tracción indirecta. (Ameri y Aboutalebi Esfahani 2008)

Con lo expuesto hasta aquí son evidentes las ventajas y desventajas de la implementación de mezclas porosas. A consecuencia de ello se trabaja en sobrepasar las falencias típicas de este tipo de mezcla basadas en la obtención de datos con nuevos estudios que abarcan el uso de materiales como lo son: la cal hidratada con propiedades *anti-stripping* en función de llenante y la fibra de nylon que aporta adherencia entre las partículas. Todo esto con el fin de aumentar la durabilidad sin comprometer su funcionalidad principal de permitir el paso del agua a través de su estructura y entre otras funciones como la mitigación de ruido y mantener unos niveles adecuados de tasas de infiltración.

Por lo anterior, un conjunto de ensayos verificará y evaluarán parámetros que garanticen las condiciones mencionadas, poniendo en práctica una metodología denominada diseño de experimentos a la cual se le debe atribuir ventajas únicas como el ahorro de recursos y tiempo, variables que toman bastante relevancia en temas investigativos.

Finalmente, esta investigación busca fomentar el uso de mezclas porosas con la optimización de esta y con el fin de visualizar la construcción de vías no solo como estructuras de durables y funcionales sino también seguras y amigables con el ambiente, adicionalmente también promover la práctica continua del diseño de experimentos en apartados investigativos desde colegiatura hasta maestrías o doctorados.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El manejo de aguas superficiales en el diseño de carreteras se controla a través del bombeo, aun así, este puede verse ampliamente mejorado con las características propias de una mezcla asfáltica porosa, en las cuales se ha ido mejorando aspectos como la baja durabilidad y el alza en costos en su ejecución y mantenimiento, los cuales anteriormente debilitaban la idea de su uso extensivo. De acuerdo con la normativa colombiana para el diseño de este tipo de mezclas se exige el uso de betunes modificados, usualmente con polímeros que suelen ser costosos y no óptimos para su posterior reciclaje como RAP (Reclaimed Asphalt Pavement).

Además, investigaciones sobre las propiedades mecánicas de las mezclas porosas modificadas, concuerdan que debido a la baja temperatura de mezcla y su topología compleja de sus poros se tiene mayor probabilidad de sufrir daños de desprendimiento debido a la humedad. Por lo tanto, la susceptibilidad a la humedad en el asfalto poroso es una de las propiedades con mayor relevancia a evaluar, dado que la presencia de agua logra afectar la cohesión del ligante como la adhesión entre el betún y el agregado; para contrarrestar estos efectos, los estudios se concentran en el uso de nuevos modificadores o aditivos, para lo cual se ha cuestionado sobre: ***¿la incorporación de fibras de nylon y cal hidratada puede ser una alternativa para mejorar el desempeño mecánico de la mezcla porosa?***

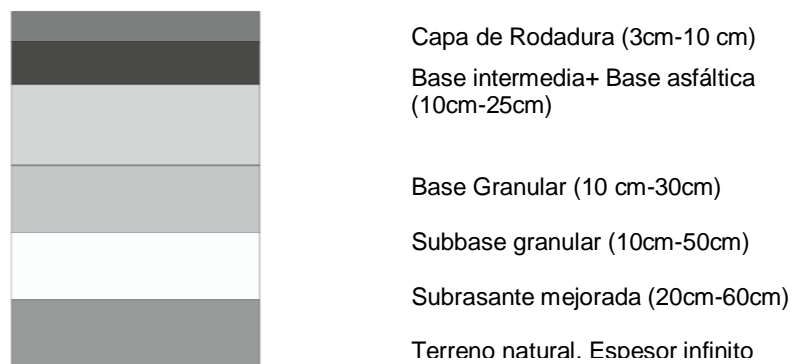
4. MARCO DE REFERENCIA

4.1. MARCO TEÓRICO

Los pavimentos son estructuras viales multicapa, es decir que lo constituye capas superpuestas por materiales seleccionados para soportar cargas impuestas por el tránsito y por las condiciones ambientales. La estructura general de un pavimento consta de una subrasante, subrasante mejorada, base sub-granular, base granular y una carpeta asfáltica, esta última en pavimento flexible está conformada por la carpeta de rodadura, la base intermedia y la base asfáltica (ver **Figura. 1**)

La carpeta asfáltica convencional debe ser diseñada y construida con el fin de permitir una circulación cómoda y segura, impedir la penetración directa del agua y resistir cargas de la superficie. Cada una de las capas que componen la carpeta asfáltica están compuestas por mezclas asfálticas, las cuales a su vez se componen de materiales granulares (agregado pétreo)(Rondón y Reyes 2015)

Figura. 1 Perfil típico estructura de un Pavimento Flexible.



Fuente: (Rondón y Reyes 2015)

4.1.1. Mezclas asfálticas

La mezcla se compone por materiales granulares, en este caso agregados pétreos combinados con un ligante asfáltico, este tipo de mezclas se puede realizar in situ o en plantas mezcladoras. Existe una variedad de mezclas asfálticas, que se diferencia en cuanto a su función dentro de la estructura del pavimento, entre ellas se encuentran: mezclas abiertas en frío o en caliente, mezclas densas en frío, mezclas asfálticas modificadas, mezclas asfálticas drenantes, mezclas tibias, entre otras. (Rondón y Reyes 2015) A continuación, se muestra la **Tabla 1** en la que se comparan variables como granulometría, temperatura y tipo de ligante para algunas de las mezclas asfálticas anteriormente mencionadas.

Tabla 1. Cuadro Comparativo. Variables entre Tipos de Mezclas Asfálticas.

TIPO DE MEZCLA		Mezclas Modificadas-RAP	Mezcla Drenante	Mezcla Asfáltica Abierta en Caliente			Mezcla Asfáltica Abierta en Frio		
	INVIAS	ART. 461	ART.453	ART.451-13			ART. 441-13		
	IDU	ART,450	ART.511	ART. 514			ART. 552		
GRANULOMETRIA	TAMIZ	% PASA							
				MAC-75	MAC-63	MAC-50	MAF-38	MAF-25	MAF-19
	3"	-	-	100	-	-	-	-	-
	2 1/2"	-	-	95-100	100	-	-	-	-
	2"	-	-	-	-	100	-	-	-
	1 1/2"	100	-	30-70	35-70	75-90	100	-	-
	1"	75-100	-	-	-	-	70-95	100	-
	3/4"	65-100	100	3-20.	5-20.	50-70	-	70-95	100
	1/2"	-	70-100	-	-	-	25-55	9	70-95
	3/8"	45-75	50-75	0-5	-	-	-	20-45	-
	No 4	30-60	15-32	-	-	8-20.	0-15	0-20	oct-30
	No 8	-	-	-	0-5	-	0-5	0-10	0-10
	No.10	20-45	9-20.						
	No.40	10-30.	5-12.						
	No.100	-		-	-	0-5	-	-	-
	No.200	5-20.	3-7.	-	-	-	0-2	0-2	0-2
	TEMPERATURA				110-120			< 80	
LIGANTE		CA 80-100	CA MODIFICADO	CA 60-70 / CA 40-50			EMULSION ASFALTICA CRM		

Fuente: (INVIAS 2013)

De manera general las propiedades que se esperan de una mezcla asfáltica son: la resistencia a las deformaciones permanentes, la resistencia al deslizamiento, impermeabilidad, durabilidad y economía.

4.1.2. Mezclas Asfálticas Modificadas

Con la medida del tiempo las mezclas asfálticas han solicitado ser modificadas en su composición para suplir las nuevas necesidades que trae el aumento del tráfico, como el mayor número de cargas por eje, mayor presión de inflado, etcétera (Montejo 2002). Así pues, se requiere para la elaboración de la mezcla asfáltica un ligante con mejores propiedades con la incorporación de polímeros o aditivos.

En la industria existen dos técnicas de la utilización de polímero y aditivos. Estas técnicas de modificación se les denominan vía húmeda y vía seca. Por **vía húmeda**, el polímero se agrega al asfalto a altas temperaturas y seguido es adicionado al agregado pétreo. En la **Figura. 2** se evidencia que el polímero, en este caso caucho se adiciona en la mezcla de asfalto para su posterior almacenamiento y distribución; en cambio por la **vía seca** el aditivo o polímero se reemplaza por una parte del agregado pétreo, para luego recibir el asfalto y formar la mezcla asfáltica. (Rondón y Reyes 2015)

Sin embargo, ambos métodos tienen desventajas, la vía húmeda presenta mayores costos por lo general y tiene un aumento de la temperatura de mezclado, lo que significa que se requiere energía adicional en su proceso de fabricación. Por la vía seca el tiempo de compactación de la mezcla es mayor y demanda mayor cantidad de ligante asfáltico.

Figura. 2 Proceso de Fabricación del asfalto-caucho (vía húmeda)



Fuente: (Rondón y Reyes 2015)

4.1.3. Mezclas Drenantes

Las mezclas drenantes se caracterizan por el porcentaje de vacíos, que oscila entre 15 a 20% y por la proporción de agregado fino, la cual debe ser baja (menos al 20%). Debido a lo anterior, estas mezclas permiten que el agua filtre de manera rápida y su vez que esta se dirija hacia obras de drenaje.

La elaboración de las briquetas para este tipo de mezclas se realiza mediante el método especificado en la norma INV. E-760-13, NLT 352/00. Las mezclas

drenantes se conocen con la abreviatura MD de acuerdo con el artículo 453-13 del INVIAS y como MDr15 en el artículo 512 del IDU. En el desarrollo de este tipo de mezcla, es necesario tener en cuenta, el cemento asfáltico, la calidad de los agregados y la granulometría. El cemento asfáltico, por ejemplo, es modificado por polímeros y se clasifica del TIPO I al TIPO V como se evidencia en la **Tabla 2** para la norma invias y la **Tabla 3** para la norma IDU.

Tabla 2. Requerimiento para el cemento Asfáltico en MD

CARACTERÍSTICA	NORMA	TIPO I	TIPO II a	TIPO II b	TIPO III	TIPO IV	TIPO V
Asfalto Original							
Penetración (25°C, 100g 5s) 0.1mm	E-706	55 a 70	40 a 70	55 a 70	55 a 70	80 a 130	15 a 40
Punto de Ablandamiento, °C, mínimo	E-712	58	58	58	65	60	65-
Ductilidad (5°C, 5cm/min), cm, mínimo	E-702	-	15	15	15	30	15
Recuperación Elástica por torsión a 25°C, %, mínimo	E-727	15	40	40	70	70	
Estabilidad al Almacenamiento	E-726 E-712	5	5	5	5	5	5
Contenido del Agua, %, máximo	E-704	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Punto de Ignición mediante la copa abierta Cleveland, °C, mínimo	E-709	230	230	230	230	230	230
Residuo del ensayo de pérdida por calentamiento en película delgada rotatoria, norma del ensayo (INV E-720)							
Pérdida de masa, %, máximo	E-720	1	1	1	1	1	0.8
Penetración del residuo, en% de la penetración original, mínimo	E-706	65	50	65	65	60	70
Incremento en el punto de ablandamiento. °C, máximo	E-712	10	10	10	10	10	10
Ductilidad (5°C, 5cm/min), cm, mínimo	E-702	-	8	8	8	15	-

. **Fuente:** Art453-13 (INVIAS 2013)

Tabla 3 Requerimiento de Cemento Asfáltico MDr15.

CARACTERÍSTICAS	NORMA	TIPO I		TIPO II		TIPO III		TIPO IV		TIPO V	
		Mín	Máx.	Mín	Máx.	Mín	Máx.	Mín	Máx.	Mín	Máx.
Penetración (25°C, 100g 5s) 0.1mm	E-706	55	70	55	70	55	70	80	130	15	40
Punto de Ablandamiento, °C, mínimo	E-712	58	-	58	-	65	-	60	-	65	-
Ductilidad (5°C, 5cm/min), cm, mínimo	E-702	-	-	15	-	15	-	30	-	-	-
Recuperación Elástica por torsión a 25°C, %, mínimo	E-727	15	-	40	-	70	-	70	-	15	-
Estabilidad al Almacenamiento	E-726 E-712	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5
Contenido del Agua, %, máximo	E-704	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2
Punto de Ignición mediante la copa abierta Cleveland, °C, mínimo	E-709	230	-	230		230		230		230	
Residuo del ensayo de pérdida por calentamiento en película delgada rotatoria, norma del ensayo (INV E-720)											
Pérdida de masa, %, máximo	E-720	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
Penetración del residual, en% de la penetración original, mínimo	E-706	65		65		65		60		70	
Ductilidad (5°C, 5cm/min), cm, mínimo	E-702	-	-	8	-	8	-	15	-	-	-

Fuente: Art. 512. (IDU 2011)

La granulometría de una mezcla drenante se caracteriza por tener un alto porcentaje de agregado grueso a comparación del agregado fino, todo con el fin de lograr un mayor contenido de vacíos en la mezcla. Por tanto, para la normatividad del INVIAS como la normatividad del IDU se maneja el mismo porcentaje pasa, como se evidencia en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Granulometría Mezclas MD y MDr15

Tamiz		Porcentaje que pasa
Normal	Alternó	MD y MDr15
19mm	3/4"	100
12.5	1/2"	70-100
9.5	3/8"	50-75
4.75	No. 4	15-32
2	No.10	10-22
425	No.40	6-13
75	No.200	3-6

Fuente: (INVIAS 2013)

Finalmente, para asegurar la calidad de los agregados es imprescindible tener en cuenta los parámetros estipulados en la **Tabla 5** por el INVIAS y los parámetros del IDU consignados en la **Tabla 6**. En base a esta información se observa discrepancias, en primera lugar, la categoría de tránsito existen 4 en la normatividad IDU mientras que en la de INVIAS se tiene 2, en segundo lugar, el instituto de desarrollo Urbano cuenta con valores menos conservadores en el tránsito T2-T3 en contraste con lo presentado por el INVIAS en las categorías NT2-NT3.

Tabla 5. Caracterización de los Agregados Mezclas drenantes

Ensayo	Método	NT2-NT3
Resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles	INV. E-218 ,219	25% máx.
Micro Deval	INV. E-238	20% máx.
10% de Finos en seco	INV. E-224	110 kN mín.
10% de dinos relación húmeda/seco	INV. E-224	75% mín.
Pérdida en ensayo de solidez	INV. E-220	Sulf.sodio:12% máx. Sulfato de Magnesio:18% máx.
Caras fracturadas: 1 Cara	INV. E-227	85% mín.
Caras fracturadas: 2Caras	INV. E-227	70% mín.
Coeficiente de pulimento	INV. E-232	0.45 mín.
Partículas planas y alargadas	INV. E-240	10% máx.
Contenido de impurezas	INV. E-237	0.5% máx.
Índice de plasticidad	INV. E-125, 126	No plástico
Equivalente de arena	INV. E-133	50% mín.
Pérdida cántabro tras inmersión	INV. E-760	40% máx.

Fuente: Art. 453 (INVIAS 2013)

Tabla 6 Caracterización de los Agregados Mezclas drenantes

ENSAYO		NORMA	REQUISITOS POR CATEGORIA DE TRÁNSITO	
			T2-T3	T4-T5
AGREGADOS GRUESOS				
Dureza				
Desgaste de los Ángeles	En Seco 500 revoluciones	INV E-218	30	25
	% máximo			
Micro deval, % máximo		INV E-238	25	20
10% de finos	Valor en seco, kN mínimo	INV E-224	75	110
	Relación húmeda/seco, % min		75	75
Durabilidad				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	Sulfato de Magnesio	INV E-220	18	18
Geometría de las partículas				
Partículas Fracturadas mecánicamente, % mín.	1 cara	INV E-227	75-60	90-75
	2 caras			
Índice de Aplanamiento, % máx.		INV E-230	25	20
Índice de Alargamiento, % máx.			25	20
Resistencia al pulimento				
Coeficiente de Pulimento Acelerado para las capas de rodadura, valor min		INV E-232	0.45	0.5
AGREGADOS FINOS				
Contenido de Arena Natural				
Proporción máxima de arena natura, en peso		-	50	50
Durabilidad				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	Sulfato de Magnesio	INV E-220	18	18
Geometría de las partículas				
Angularidad del Agregado fino, % mínimo		AASTO T-304	45	45

. **Fuente:** Art.512.(IDU 2011)

4.1.4. Diseño y análisis de Experimentos

Es normal encontrar que los experimentos se basen en el ensayo y en el error en lugar de implementar un diseño experimental que garantice unas respuestas al objeto de estudio. Es necesario trabajar de manera más eficaz, optimizando tiempos y utilizando pocos recursos.

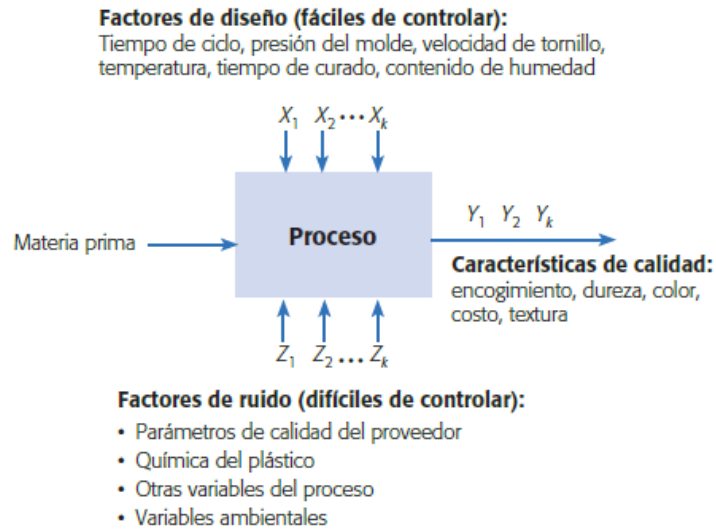
El diseño estadístico de experimentos es precisamente la forma más eficaz de hacer ensayos, pues logra resolver algunos problemas típicos como comparar dos o más materiales con el fin de elegir el mejor, encontrar las condiciones de operación (temperatura, velocidad, entre otros), reducir el tiempo de ciclo del proceso, apoyar el diseño o rediseño de los nuevos procesos y/o productos (Gutierrez Pulido, Humberto; de la Vara Salazar 2012) entre otras problemáticas.

Con base a lo anterior se evidencia que esta metodología se ha consolidado como técnicas estadísticas e ingenieriles para entenderse manera más sencilla la relación causa efecto.

- **Variables, factores y niveles**

En todo proceso se distinguen una serie de variables o factores. Entre ellas la **variable de respuesta**, por la cual se conoce el efecto de cada una de las pruebas experimentales y por lo general estas variables se denotan con la letra *y*. **Factores controlables**, variables de características de los materiales que se puede manipular su nivel de operación, esto es lo que hace que se pueda experimentar con ellos. **Factores no controlables** también denominados factores de ruido son aquellos factores externos como la luz, la temperatura, los cuales pueden pasar de “no controlables” a controlables si se cuenta con los mecanismos para ello. **Factores Estudiados**, se investigan en el experimento para ver cómo influye en la variable de respuesta (Gutierrez Pulido, Humberto; de la Vara Salazar 2012). En la **Figura. 3** como se muestra un esquema de cómo se aplican los factores anteriormente mencionados iniciando el proceso con la materia prima y finalizando con el producto con características de calidad.

Figura. 3 Ejemplo de factores y variables en la fabricación de un envase de plástico.



Fuente: (Gutierrez Pulido, Humberto; de la Vara Salazar 2012)

• Niveles y tratamientos

Valores que se asignan al factor de control, las combinaciones que se realiza con los niveles se les denomina tratamiento, en esta investigación se determinará como diseños.

• Etapas en el Diseño de Experimentos

Para garantiza el éxito el estudio experimental se da mayor prioridad a la planeación, la cual se divide de la siguiente manera.

1. **Delimitar el Problema u Objeto de Estudio:** Aclarar mediante investigación previa el objeto de estudio.
2. **Elección de variables de respuesta:** Se escogen aquellas variables que mejor caractericen el objeto de estudio, además de garantizar que los instrumentos de medición serán preciso para aprobar que las variables sean confiables.
3. **Determinación de factores que deben estudiarse:** No se puede saber de manera a priori que factores que influyen en el objeto de estudio, sin embargo, si se debe utilizar toda la información acerca de los factores que se consideran con un mayor efecto.
4. **Seleccionar los niveles de cada factor:** Se determina cuántas repeticiones se hará un proceso teniendo en cuenta el costo y el tiempo.
5. **Planear y Organizar el trabajo experimental:** se organiza el trabajo como las persona que intervienen en el proceso entro otros

- 6. Realizar el experimento.** Se sigue el planteamiento del numeral anterior y se prosigue al análisis con métodos estadísticos inferenciales, como en análisis de variancia, luego sigue el proceso de interpretación desde contrarrestar conjeturas hasta verifica supuestos y así elegir el tratamiento o el diseño ganador. (Gutierrez Pulido, Humberto; de la Vara Salazar 2012)

En el transcurso de la historia se ha evidenciado metodologías o técnicas que logran optimizar el análisis de experimentos mediante estudios estadísticos en los cuales se plantea los experimentos para posteriormente organizar de una manera más ordenada y eficiente los resultados obtenidos. Existen tres enfoques principales: clásicos, Shainin y Taguchi. (Escalante Vásquez 2014)

Con base a lo anterior se hace necesario ampliar el último enfoque mencionado, el método Taguchi, el cual es un proceso que logra determinar los factores significativos de un experimento. Su desarrollador el Doctor Genichi Taguchi aporta conceptos como “factores de Ruido” los cuales se clasifican en el *ruido externo* el cual hace referencia al ambiente donde se realiza el proceso y el *ruido interno* se refiere a la variación generada por el proceso y se debe a su propia naturaleza. (Gutierrez Pulido, Humberto; de la Vara Salazar 2012)

También se habla de “Robustez” es la capacidad del producto que no sufra variaciones de manera significativa por los efectos de fuentes de “ruido” (Escalante Vásquez 2014)

Elementos del método Taguchi

El **Arreglo Ortogonal (AO)** se expresa por medio de una matriz que consta de unas columnas donde se especifican las combinaciones de las variables con sus niveles y en las filas se consigna el número de pruebas. La implementación de los arreglos ortogonales reduce costos y tiempo, ya que solo representa una fracción del total de los experimentos. El formato general para representar un arreglo es de la siguiente manera:

$$AO = L_n(a^k) \quad (1)$$

Donde:

L= Cuadros de Latino

n= Número de Pruebas

k= Numero de Columnas con “a” Niveles

En la **Tabla 7** se establece una matriz con la cual, se da un ejemplo sencillo de un arreglo ortogonal. $AO = L_4(2^3)$

Tabla 7. Matriz con las combinaciones y número de Pruebas

Prueba	Columnas		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Fuente: (Escalante Vásquez 2014)

Lo particular de la metodología Taguchi es que maneja unas variables adicionales, denominadas variables o características de calidad. La variable “entre más pequeña mejor”, donde solo se exige que el resultado no exceda cierto valor máximo. La variable “entre más grande mejor”, exige que sea mayores que un valor mínimo. Y la variable de “el valor nominal es mejor” el cual debe tener un valor específico. Lo anterior se le denomina razón *señal /ruido*, y se realiza en cada combinación, se dice que la combinación más robusta de los niveles de los factores controlables maximiza el estadístico *señal /ruido*. En la **Tabla 8** Se consigna las variables de calidad anteriormente mencionadas.

Tabla 8. Razones S/N para los diferentes tipos de variables de respuesta.

Tipo de característica	Razón Señal/Ruido (S/R) o (S/N)
Mientras más pequeña es mejor	$-10 \log \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right)$
Mientras más grande es mejor	$-10 \log \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right)$
Su Valor nominal es lo mejor (TIPO I)	$10 \log \left(\frac{Y_i^2}{S^2} \right)$
Su valor Nominal es lo mejor (TIPO II)	$-10 \log \left(\frac{p}{(1-p)} \right)$
Proporción defectuosa	

Fuente: (Gutierrez Pulido, Humberto; de la Vara Salazar 2012)

- **Análisis estadístico**

En el contexto de análisis estadístico existen una serie de pruebas para determinar la normalidad, que hace referencia a qué tan bien siguen los datos una distribución. La **Prueba de Anderson-Darling**, mediante la aplicación MiniTab utiliza el valor “p” para corroborar que los datos derivan de la distribución escogida, este valor si

es menor que un 0.05, se rechaza la hipótesis de que los datos son provenientes de dicha distribución. (Minitab Support 2019)

- H_0 : Los datos siguen una distribución especificada
- H_1 : Los datos no siguen una distribución especificada

Adicional a esto existen otras pruebas estadísticas que pueden sumar veracidad y practicidad en la lectura de datos, entre ellas se encuentran:

Prueba Levene se basa en el manejo de la desviación estándar absoluta, para luego evaluar la media de la desviación, la idea se basa en determinar si las medias son iguales pues así se garantiza que las varianzas de las observaciones de todos los tratamientos serían iguales, esto lo hace el programa MiniTab mediante el estadístico F ANOVA para comprobar la igualdad de las medias. (Minitab Support 2019)

Tabla 9 Tabla de ANOVA

Fuente de Variabilidad	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadro medio	Fo	Valor-p
Tratamiento	$SC = \left(\sum_{i=1}^k \frac{Y_i^2}{n_i} - \frac{Y^2}{N} \right)$	$k - 1$	$CM = \frac{SC}{k - 1}$	$\frac{CM}{CME}$	$P(F > F_0)$
Error	$SCE = SCT - SC$	$N - k$	$CME = \frac{SCE}{N - k}$		
Total	$SC = \left(\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^n Y_{ji}^2 - \frac{Y^2}{N} \right)$	$N - 1$			

Fuente: (Gutierrez Pulido, Humberto; de la Vara Salazar 2012)

Prueba Tukey es la herramienta más potente ideal para realizar comparaciones múltiples que permiten revisar qué medidas son diferentes y su grado de diferencia entre sí, esto mediante un conjunto de intervalos de confianza. A su vez Tukey controla la tasa de error, pues al evaluar de manera múltiple se corre el riesgo de tener mayor error al que se tendría al evaluar una comparación individual. Es por esto, que la prueba Tukey ajusta el nivel de confianza (Minitab Support 2019)

Pruebas t 2 muestras Compara las medias de 2 grupos independientes, se implementa suponiendo que se encuentran con distribución normal y varianzas iguales. No es aconsejable realizar una prueba preliminar para evaluar varianza antes de la implementación de la prueba t 2 muestras, pero en este procedimiento se encuentra una serie de desventajas, debida que la varianza esta sujeta a limitaciones y supuestos significativos. (Minitab Support 2019)

4.2. MARCO CONCEPTUAL

Polimeros: Son sustancia equivalentes a la union de moleculas pequeñas, denominada monomeros. Se logra clasificar acorde a su estructura y propiedades para el uso vial, entre ellos existen dos grandes grupos, **los plastomeros** los cuales tiene deformacion pseudoplasticas con poca elasticidad, sobre salen el polietileno, polipropileno y **E.V.A**; **los elastomero o cauchos**, que adquieren una estructura parcialmente reticulada con propiedades elasticas, los causos mas usados son **S.B.R y S.B.S.** (Montejo 2002)

Fibras: Es un mono filamneto para el reforzamiento, entre las mas conocidas se tiene:

Fibras Minerales

- **Asbesto:** Rigidiza el asfalto y modifica las propiedades de flujo, su implementacion es baja por los problemas de salud que estegenera.
- **Fibras de Vidrio:** ocasiana baja adherencia con el asfalto y enlogacion a la rotura.
- **Lana mineral:** Reduce la deformacion permante y aumenta la resistencia ala tension

Fibras Celulosas: Abarca la smismas propiedades que las fibras minerales con la diferencia que posee gran afinidad por el agua.

Cal hidratada: También definida como Hidróxido de Calcio, es un compuesto inorgánico con la fórmula química $\text{Ca}(\text{OH})^2$, se fabrica a partir de la calcinación de la roca caliza y seguido se hidrata. Se conoce como un agente anti *stripping* y se suele usar cantidades alrededor del 1 al 3%. (Montejo 2002). Este compuesto tiene una apariencia de polvo lo que ha llevado a compararse con los rellenos naturales o fillers, llevándole una ventaja en la cantidad de vacíos entre 60-70%. (Lesueur, Petit y Ritter 2013)

La cal hidratada se especifica en la norma europea EN 459-1 para aplicaciones de construcción e ingeniería civil y en EE. UU se encuentran en ASTM C 1097 y AASHTO M 303. (Lesueur, Petit y Ritter 2013)

Agregados pétreos: Conglomerado de partículas inertes de gravas, arenas, finos y/o fillers (naturales o triturados), utilizados ya sea para la fabricación de mezclas asfálticas, concretos hidráulicos y materiales estabilizados o para la construcción de capas de terraplén, afirmado, subbase y/o base granular. Los agregados pétreos deben poseer una granulometría adecuada y requisitos mínimos de calidad para conformar mezclas asfálticas. Dichas gradaciones y requisitos de calidad se confirman mediante los ensayos de: resistencia al desgaste en la máquina de Los Ángeles (AASHTO T 96, INV. E-21813, 219-13)., Micro-Deval (AASHTO T327, INV. E-238-13), 10% de finos (DNER-ME 096, INV. E-224-13), Caras fracturadas a una y dos caras (ASTM D 5821, INV. E-227-13), Índice de aplanamiento y alargamiento (NLT 354- 91, INV. E-230-13). (Quintana, 2015)

4.3. MARCO LEGAL

A continuación, en la, se identifica de manera general la normativa nacional e internacional implementada en el desarrollo del proyecto.

Tabla 10. Normativa de Ensayos.

ENSAYOS	ESTANDAR COLOMBIANA	US ESTANDAR	EU ESTÁNDAR
CARACTERIZACIÓN			
Gravedad específica y absorción de los Agregados gruesos	INV.E-223	-	-
Porcentajes de Caras fracturadas	INV. E 227	-	-
Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½") por medio de la máquina de los ángeles.	INV.E 218	-	-
Equivalente de arena de suelos y agregados finos.	INV.E 133	-	-
Gravedad Específica y absorción del agregado Fino	INV.E 222	-	-
RESULTADOS			
Caracterización de las mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste -seco	INV.E-760	AASHTO T96	EN 12697
Ensayo de cántabro perdida desgaste-húmedo	-	-	NLT 362/92
Porcentajes de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas	INV.E 736	AASHTO T269	-
Vacíos interconectados	-	ASTM D 7063-05	-
CONTROL			
Escurrecimiento	INV.E 825-13	-	EN 12697-18

Fuente: Docente Asesor Carlos Slebi

4.4. ESTADO DEL ARTE

En disposición de mejorar la seguridad vial, calidad de vida de los ciudadanos y mitigar impactos ambientales. Científicos e investigadores desde hace más de 30 años se han enfocado en el desarrollo de infraestructuras más sostenibles. Las mezclas de gradación abierta o mezclas porosas como son conocidas en Europa son consideradas una solución ambientalmente amigable dadas las múltiples ventajas que ofrece, como por ejemplo: mejorar la fricción de la superficie, aminorar la escorrentía superficial al permitir que el agua permee por su estructura, disminuir salpicaduras, rociados e hidroplaneo, los cuales son generados por las películas de agua que quedan en la superficie de la capa asfáltica (Ranieri et al. 2017). Adicionalmente, las mezclas drenantes, absorben el ruido por el paso de vehículos sobre el asfalto, pues a mayor cantidad de poros presentes en mezcla mayor será la conexión para lograr mitigar el ruido de diferentes frecuencias, también se debe tener en cuenta las dimensiones de los poros y su variabilidad (Vaitkus et al. 2017).

Este tipo de asfalto fue introducido e implementado en varios países a finales de 1990 y principios de los 2000, con un periodo de diseño de 10 años, inferior a las mezclas asfálticas densas que tienen un tiempo estimado de 18 años de operación, esta disminución de vida útil se deben a diferentes factores, en primera instancia y tal vez la más significativa, está el desprendimiento de las partículas, producto de las fallas por esfuerzos cortantes de numerosas cargas generadas por las llantas en el pavimento (Scholz y Grabowiecki 2007). Al incursionar en detalle, se tiene que el agua juega un papel aún más importante en el efecto de *raveling*, pues el envejecimiento, resultado del continuo contacto del agua presente en el interior de los poros de la mezcla, produce una remoción acelerada del aglutinante bituminoso con el agregado, lo que a su vez disminuye las propiedades de adhesión de la mezcla (Ameri et al. 2018b)

Simultáneamente, la complejidad topológica del asfalto dificulta la evacuación de toda el agua y/o humedad que se encuentra en la mezcla, pues está sujeta al proceso de difusión de evaporación que se divide en una primera etapa donde se tiene alta tasa de evaporación en la zona más superficial de la mezcla y una segunda etapa, donde el proceso se vuelve más lento debido a la interacción entre el fujo, la gravedad y fuerzas viscosas al interior de la mezcla. (Garcia et al. 2019) Al no lograr remover el agua, se hace evidente el cambio de la estructura interna a causa de un campo de flujo que genera presión de poros la cual puede eliminar el filler, debilitar aglutinante y causar disminución en la cohesión y rigidez de la mezcla (Saeed et al. 2019)

A consecuencia de lo anterior, las primeras generaciones de asfalto poroso se diseñaron con altos contenidos de aglutinante para permitir una mejor interacción y envolvimiento del agregado, sin embargo, no tuvieron buenos resultados debido a la baja cantidad de filler y el aglutinante sufre con más facilidad escorrentía (Afonso, Dinis-Almeida y Fael 2017), efecto que no solo es producto de altas temperaturas en la producción, sino también en días calurosos de verano sí no se

incluye ningún material que contrarreste dicho efecto, por tanto, el aglutinante se ablanda y fluye gradualmente por la estructura de vacíos debido a la acción de la gravedad (Lyons y Putman 2013).

Con base a las dificultades mencionadas a lo largo del texto, se busca el mejoramiento mecánico y la durabilidad de las mezclas porosas. Para ello, en la actualidad se han planteado nuevas alternativas que incluye el uso de fibras y de ligantes bituminosos modificados, los cuales disminuye la penetración y optimiza las características de la mezcla asfáltica, como la fatiga, cizallamiento y la ductilidad (Xiong et al. 2015). También, se han implementado nanomateriales en ligantes y mezclas, por ejemplo, el nano-sílice y polvo de cal que procede a una reducción del escurrimiento y mejoramientos mecánicos de la mezcla asfáltica. En la investigación realizada por (Tanzadeh y Shahrezagamasaei 2017), determinó que el uso en porciones de 0,4% de nona-sílice en el aglutínate y en 1% de cal en polvo logran reducir el drenaje del ligante y mejorar la resistencia al agrietamiento. A pesar de ello, en otro estudio realizado por Mahmoud Ameri se demostró que el uso de nano materiales de composición grasa y en estado líquido como Evonik y Zycotherm se distinguen por poseer propiedades *anti-stripping*, empleado en proporciones de 0,3% y 0,1 % respecto al peso del aglutinante, creando así enlaces covalentes entre el betún y el agregado que evita la penetración de la humedad, mientras que la cal hidratada se implementa en un porcentaje mayor, de un 2% , esto a razón de las características propias de este material, que logra crear hidrofobia ayudando a la adherencia del ligante con el agregado.(Ameri et al. 2018a)

El uso de la cal hidratada en el asfalto poroso es una práctica aceptada por muchas agencias de carreteras para aumentar la resistencia de la mezcla y mejorar la durabilidad (Ameri y Aboutalebi Esfahani 2008). Su gran similitud respecto a su origen mineral y su textura tipo polvo con los rellenos o lo fillers, han generado considerarla como tal. Una normativa europea hace la aclaración que en mezclas calientes, lo conforma materiales como la cal hidratada y el cemento, también existe el caso de un relleno mixto de cal hidratada más mezcla de relleno (Lesueur, Petit y Ritter 2013) e Incluso algunas propiedades de la cal hidratada superan las de los rellenos minerales, como por ejemplo los vacíos en el relleno seco compactado, donde mientras el relleno mineral está en valores de 28-45, la cal hidratada casi los duplica 60-70.

Ahora bien, el efecto de la cal hidratada sobre la mezclas asfáltica porosa se basa en dos grandes premisas, la primera el efecto de la floculación de la arcilla que es similar a la que sucede en la estabilización de suelos(Jesús et al. 2019); la segunda acción es sobre el betún, en la cual se hace necesario diferir el efecto físico-químico donde este último se puede enfatizar en la acción de la cal sobre el betún como un neutralizador acido-base de los componente ácidos del betún, la cal debido a su composición ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) es altamente reactiva y su peso molecular bajo, químicamente se define como base fuerte que reacciona fácilmente con los ácidos eliminándolos de la matriz del asfalto mediante absorción en la superficie de las partículas(Little y Petersen 2005).Por último, el efecto físico sobre el betún,

derivado de la alta porosidad de la cal, explica una mayor efecto de rigidez en el betún que el que presentan los fillers.(Lesueur, Petit y Ritter 2013)

Como se mencionó anterior mente una alternativa, es la implementación de las fibras, pues permite el soporte de mayores resistencias de energía de tensión antes de la fallas por agrietamiento, el comportamiento de estas fibras con el agregado sirven de puente permitiendo la dispersión de carga y evitando la propagación de fallas; por lo general el uso de las fibras en los ligantes aumenta la resistencia al ahuellamiento por lo que hace necesario obtener cantidades optimas entre Fibras y betún, además se debe evaluar la longitud de las fibras pues su rendimiento se puede ver afectada por esta característica particular cambiando consigo su rendimiento.(Slebi y Lastra 2019).

Ahora, uno de los principales objetivos del uso de las fibras es evitar el desprendimiento de partículas además de brindar mejoras en rendimiento de fatiga y enrutamiento. Estudios han demostrado que el uso de fibras como la treta pack en porciones de 0,5% del peso de la mezcla, mejora la resistencia a la abrasión (Andrés-Valeri et al. 2018) de igual manera el uso de fibras orgánicas de palma datilera y polímero en una mezcla dio como resultado perdidas menores significativas (Hassan y Al-Jabri 2005); a pesar de estos resultados positivos, el uso de fibras celulósica, fibras de vidrio y basalto presentan mayores pérdidas de partículas que la mezclas porosas sin esta adición (Tanzadeh et al. 2019)-(Afonso, Dinis-Almeida y Fael 2017).

Finalmente, el uso de fibras de nylon ha sido una de las fibras sintéticas con mejor respuesta en el estudio de mezclas asfálticas densas, donde mejoró al agrietamiento por fatiga al aumentar la energía de fractura, esto evaluado a través de pruebas de tracción indirecta. Con el uso de una fibra de 12 mm y una fracción de volumen del 1% mostró un aumento de aproximadamente un 85% más que el de los hormigones de asfalto fresco (Lee et al. 2005).

5. OBJETIVOS

5.1. GENERAL

Desarrollar mezclas asfálticas porosas modificadas con fibras de nylon y cal hidratada para obtener una mayor durabilidad sin comprometer la funcionalidad de la mezcla.

5.2. ESPECÍFICOS

Caracterizar los materiales mediante las especificaciones indicadas en la normativa colombiana INVIAS para garantizar condiciones drenantes de la mezcla.

Establecer el diseño de una mezcla porosa, por medio de investigación en la literatura, garantizando la funcionalidad en términos de vacíos totales admisibles

Desarrollar un plan experimental teniendo en cuenta ensayos de estabilidad, mecánicos y de funcionalidad.

Realizar diseños de mezcla con base la metodología Taguchi con el fin de minimizar la cantidad de ensayos y optimizar tiempos.

Evaluar el efecto de las fibras, cal hidratada y porcentaje de asfalto empleado sobre las mezclas porosas teniendo en cuenta técnicas estadísticas, propias de la metodología Taguchi.

6. ALCANCES Y LIMITACIONES

La presente investigación explora las diferentes dosificaciones entre betún, cal hidratada y fibras de nylon sobre una mezcla asfáltica porosa, para ello se realizan 9 diseños diferentes con 6 réplicas para cada uno. Sobre estos especímenes se efectuarán una serie de ensayos para comprobar la optimización y mejoramiento de las propiedades mecánicas de las mezclas drenantes.

El diseño metodológico está basado en primer lugar en el desarrollo de ensayos de caracterización del material y en segundo lugar en los ensayos más representativos para evaluar las propiedades de las mezclas drenantes, como la pérdida de partículas mediante el ensayo de Cántabro en condición seca y húmeda, la capacidad de filtración de cada una de las probetas con el ensayo de permeabilidad y ensayo de vacíos totales e interconectados, para verificar el porcentaje de huecos de aire y el ensayos de escurrimiento como parámetro de control.

La implementación de maquinaria de los laboratorios presentes en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia permite en el transcurso de un semestre académico el desarrollo de los ensayos sobre los 54 especímenes y la obtención de datos para su posterior análisis. Adicionalmente, debido al número reducido de briquetas se realiza un diseño de experimentos con los que se podrá dar veracidad de los datos obtenidos además de optimizar tiempos.

Sin embargo, en el desarrollo de la investigación se ven algunas restricciones como las constantes fallas en el equipo de laboratorio y presupuesto. Por tal motivo, el ensayo de sensibilidad al agua ampliamente usado en las mezclas porosas no se pudo realizar. En esta investigación se priorizo el ensayo de cántabro ya que evalúa el *raveling* de la mezcla porosa el cual es una de las patologías más comunes en este tipo de mezclas

7. MATERIALES Y METODOLOGÍA

A continuación, se indican los materiales utilizados para la realización de las briquetas de mezclas asfálticas drenantes.

7.1. MATERIALES.

7.1.1. Los Agregados

Para la realización de la mezcla drenante se utilizará un material compuesto en gran porcentaje por agregados gruesos y en un menor porcentaje los agregados finos. Para garantizar un adecuado contenido de vacíos se empleó una granulometría mal gradada siguiendo las especificaciones propuestas en INV-E-736-13.

7.1.2. El Ligante

De acuerdo con el artículo 453-13 del INVIAS se establece que el ligante debe ser un Cemento Asfáltico Modificado, sin embargo, para el desarrollo de esta investigación se tomara un ligante convencional de 60/70 que cumpla con la norma de penetración INV-E 706 -13. **Tabla 11**

Tabla 11. Especificaciones Asfalto 60/70

ASFALTO 60-70				
ENSAYO	UNIDAD	NORMA INV	RESULTADO	FRECUENCIA
Penetración	0,1 mm	E-706	62	CADA LOTE
Punto de ablandamiento con aparato de anillo y bola	° C	E-712	49.6	CADA LOTE
Índice de penetración	-	E-724	-0.8	CADA LOTE
Viscosidad absoluta(60°C)	P	E-716 E-717	2210	CADA LOTE
Ductilidad	cm	E-702	150	QUINCENAL
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	99.9	SEMESTRAL
Punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland	° C	E-709	299	QUINCENAL
PÉRDIDA DE MASA EN EL HORNO DE LÁMINA ASFÁLTICA DELGADA EN MOVIMIENTO (INV. E-720) Y ENSAYOS SOBRE RESIDUO				
Pérdida de masa	%	E-720	0.2	QUINCENAL
penetración del residuo luego de la perdida por calentamiento en película delgada en movimiento % de la penetración original	%	E-706	61	QUINCENAL
índice de envejecimiento: relación de viscosidades a 60°C del asfalto residual y original	NA	E-716. E-717	NA	QUINCENAL
incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento (e - 720)	° C	E-712	4.2	QUINCENAL

Fuente: Laboratorio

7.1.3. Las fibras

Las fibras seleccionadas son sintéticas de nailon y, con referencia TUF-STRAN SF, la cual cumple con la norma ASTM C-1116. Fue seleccionada para mejorar las mezclas drenantes en términos tenacidad a la flexión, resistencia a la abrasión y al impacto, además reduce la deformación por fisuras. Las propiedades de las fibras de nylon se exponen en la ficha técnica consignada en la **Tabla 12**

Tabla 12 Técnica Fibras de Nylon

PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS	
Material	Nylon monofilamento
Gravedad Específica	1.16
Punto de Fusión	260°C (500°F)
Conductividad Eléctrica	Baja
Absorción de Agua	Despreciable
Longitud de fibra	¾" (19 mm)
Resistencia ácida y alcalina	Excelente

Fuente: (Toxement 2019)

7.1.4. Cal hidratada-Tipo E

Se selecciona la cal hidratada por su propiedad *anti-stripping*, que evita el desprendimiento de los áridos con el betún. Este material es compuesto por hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})^2$ el cual resulta de la hidratación del producto de calcinación de la roca caliza. Cumple los alineamientos de la norma NTC 1398 y su ficha técnica se expone en la **Fuente:** Autores

Tabla 13 Ficha Técnica- Cal hidratada Calco.

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	
Ca (OH) ² disponible hidróxido	Mín. 93.0%
Ca (OH) ² disponible Oxido	Mín. 70.0%
Residuos Insolubles en HCl	Máx. 1.5%
P.P.C a 100°c	Máx. 27.0%
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Residuo en tamiz No.100	Máx. 1.7%

Fuente:(Cales Colombia (Calco) 2019)

Los dos aditivos seleccionados para mejorar las propiedades de las mezclas porosas se muestran a continuación en la **Figura. 4**

Figura. 4. Aditivos: Cal hidratada y Fibras de Nailon



Fuente: Autores

7.2. PREPARACIÓN DE ESPECÍMEN.

7.2.1. Caracterización del Material

Para asegurar la calidad de la mezcla asfáltica drenante, es necesario conocer y obtener buenos resultados en los ensayos de caracterización. En primera instancia se realiza ensayos sobre los agregados gruesos, de acuerdo con las siguientes normas

- **INV.E-223-13 Gravedad específica y absorción de los Agregados gruesos**

Mediante este ensayo se obtienen la masa superficialmente seca, el volumen de la muestra y la masa seca, datos que por medio de la ecuación (1) y (2) se obtiene la densidad, gravedad específica y absorción, consignados en la **Tabla 22**.

$$\text{Gravedad Específica (SSS)} = \frac{B}{(B - C)} \quad (1)$$

$$\text{Absorción, \%} = \frac{B - A}{A} * 100 \quad (2)$$

Donde:

- A: Masa al aire de la muestra Secada al Horno, g.
- B: masa al aire de la muestra saturada y superficialmente seca, g.
- C: Masa aparente de la muestra saturada en Agua.

Figura. 5. Proceso de separación agregado grueso del fino.



Fuente: Rodríguez-Romano

- **INV.E -227-13 Porcentajes de Caras fracturadas**

Mediante este ensayo se pueden garantizar el porcentaje de caras fracturas con el fin de maximizar la resistencia al corte y aumentando la fricción de las partículas. El ensayo consta de tener una muestra de agregados previamente lavada para remover cualquier material fino, luego se esparce en una superficie para identificar el detalle de caras fracturadas y no fracturadas (bordes agudos, superficies rugosas, superficies lisas o borde redondeado superficie lisas) como se evidencia en las Finalmente se toma el peso de la muestra, peso de material de caras fracturadas, peso de la materia con caras no fracturadas y el porcentaje de caras fracturadas, que se obtuvo mediante la ecuación

$$\% \text{ caras fracturadas} = \frac{W_o - W_{cf}}{W_o} * 100 \quad (3)$$

Donde:

W_o: Peso de la Muestra

W_{cf}: Peso del material de caras fracturas, g.

Figura. 8 Identificación de Caras Fracturadas y No fracturadas. TM; 3/4".



Figura. 6 Identificación de Caras Fracturadas y No fracturadas. TM; 3/8".



Figura. 7 Identificación de Caras Fracturadas y No fracturadas. TM; 1/2".



Fuente: Rodríguez-Romano

- **INV.E 218-13. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 1/2") por medio de la máquina de los ángeles.**

Este ensayo combina las acciones de abrasión, impacto y molienda en un tambor de acero. Se escoge el Método A de acuerdo con la masa de la muestra y con ello se define el número de esferas, que varía entre 6 a 12. Después de cumplir las 500 revoluciones estipuladas por norma se hace un tamizaje de acuerdo a la Norma INV.E-213, el material más grueso se lava y se seca en horno para determinar la masa seca después del ensayo.

Ya con los resultados que proporciona se realiza los cálculos dados por la Ecuación (4)

$$\% \text{ pérdidas} = \frac{P1 - P2}{P1} * 100 \quad (4)$$

Donde:

P1: Masa de la muestra seca antes del ensayo, g

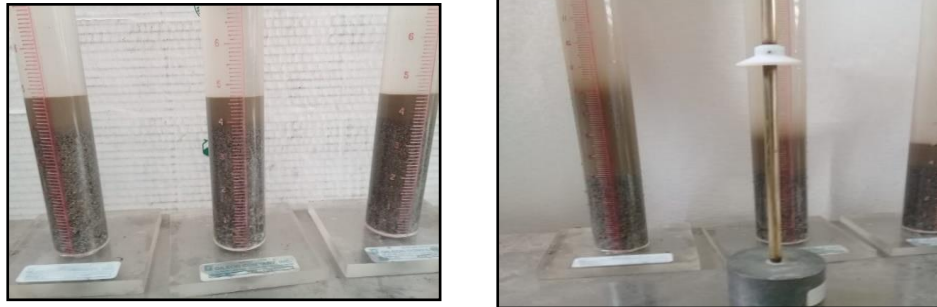
P2: Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz No.12, g.

- **INV.E 133-13 Equivalente de arena de suelos y agregados finos.**

Este ensayo tiene por objeto determinar las proporciones de polvo y material fino presente en los suelos y agregados. El procedimiento inicia con la preparación de muestras y equipos, para luego verter la solución de cloruro de calcio conjunto a la muestra, se liberan burbujas de aire golpeando el cilindro, después se agita el mediante un método mecánico y finalmente se deja sedimentar para tomar la lectura de Arcilla y la lectura de arena. Para determinar el equivalente de arena se usó la ecuación (5)

$$EA = \frac{\text{Lectura de Arena}}{\text{Lectura de Arcilla}} * 100 \quad (5)$$

Figura. 9. Proceso de Sedimentación. **Figura. 10** Dispositivo para tomar lecturas.



Fuente: Rodríguez-Romano

- **INV.E 222-13 Gravedad Específica y absorción del agregado Fino.**

Se implementa el procedimiento donde se toma un picnómetro al cual se le introduce el agregado fino saturado y superficialmente seco para posteriormente iniciar el proceso de agitación mecánica, con el fin de eliminar burbujas de aire. Del ensayo se registran los datos de la masa de la muestra seca, la masa del picnómetro y la masa total de picnómetro más la muestra. Para la obtención de la gravedad específica y el porcentaje de Absorción, se usaron las Ecuaciones (6) y (7)

$$\text{Gravedad Específica}(SH) = \frac{A}{(B + S - C)} * 100 \quad (6)$$

$$\text{Absorción}(\%) = \frac{S - A}{A} * 100 \quad (7)$$

Donde:

A: Masa al aire de la muestra seca, g.

B: Masa del picnómetro lleno de agua, g.

S: Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, g.

Figura. 11 Prueba Cono de Arena.



Fuente: Romano-Rodríguez

7.2.2. Determinación Curva Granulométrica

El material seleccionado, tanto los agregados finos como los gruesos se deben ajustar de manera paralela a la gradación indicada por la norma INVIAS-ART:453-4. Con miras a obtener una gradación que garantice una buena porosidad, todos los diseños contarán con la granulometría que se presenta en la

Tabla 14.

Tabla 14 Granulometría

Tamiz (mm)	Material acumulado (g)	Material retenido (%)	material retenido (g)	Material retenido acumulado (%)	% pasa
19	0	0	0	0	100
12.5	250	25	250	25	75
9.5	450	20	200	45	55
4.75	850	40	400	85	15
2	870	2	20	87	13
0.425	920	5	50	92	8
0.075	950	3	30	95	5
Filler	1000	5	50	100	0

Fuente: Asesor Carlos Slebi

Con base a la

Tabla 14 y la **Tabla 4** donde se determina la granulometría adecuada para las mezclas drenantes porosas acorde a la norma invias, se realiza la curva granulométrica en la **Grafica 1**.

Grafica 1 Curva Granulométrica.

Fuente: Slebi-Romano-Rodríguez

7.2.3. Planeación diseño de Experimentos

De acuerdo con lo mencionado al apartado 4.1.4 de la presente investigación se debe iniciar con la planeación y desarrollo del diseño de experimentos. A continuación, se explican las etapas de acuerdo con la investigación a realizar.

- 1- Elección de Variables de Respuesta:** Las variables de respuesta serán equivalente a los resultados obtenidos en los ensayos a realizar, es decir valores de porcentaje de vacíos totales, vacíos interconectados, desgaste y permeabilidad.
- 2- Determinación de factores que deben estudiarse:** Con base a la investigación realizada en el capítulo 4, se distinguen la adición de dos materiales para mejorar las características de la mezcla porosa, los cuales serían, las fibras sintéticas (Fibra de Nylon) , la cal hidratada y el contenido de ligante material propio de mezclas asfálticas.
- 3- Selección de Niveles de cada Factor:** De acuerdo con los valores evidenciados en las investigaciones previas que están soportadas en los artículos de referencias del presente trabajo se establecen los siguientes valores. Para el factor de Contenido de ligante: 4,6%, 4,9%y 5,2%, para el contenido de fibras de nylon los valores son: 0,0%-0,04% y 0,08%,

finalmente la cantidad de cal hidratada con valores de 0% 1,5% y 3.0%. El porcentaje es sobre el peso total de la muestra 1000 g.

Tabla 15. Resumen Factores de Control.

Control Factors				
Binder content (%)	BC	4.6	4.9	5.2
Fiber content (%)	FC	00	0.04	0.08
Hydrated lime content (%)	HLC	00	1.50	3.00

Fuente: Slebi-Rodríguez-Romano

- 4- Planeación y organización trabajo experimental:** En este apartado se inicia con la elaboración de cronograma, formatos de solicitud de laboratorios, un plan experimental que se detalla en la **Tabla 16**, obtención de los materiales y la calidad de los mismos (ensayos de caracterización) este último con el fin de minimizar los factores de ruido.

Tabla 16: Plan experimental

		Experimental plan			
Criteria	Response	Standard	Units	Comments	Replicates
Functionality		EN 12697 - 8	(%)	European Standard	6
Functionality	Interconnected air voids (IAV)	-	(%)	described in literature	3
Functionality	Permeability (<i>k</i>)	Falling head permeameter	cm/s * 10 ⁻⁵	adaptation of LCS	3
Mechanical	Cantabro test - dry conditions	EN 12697 - 17	(%)	European Standard	3
Mechanical	Cantabro test - wet conditions	NLT 362/92	(%)	Spanish Standard	3
Stability	Binder draindown test	EN 12697 - 18	(%)	Schellenberg method	2

Fuente: Slebi-Rodríguez-Romano

- 5- Realización del Experimento:** Se realizan los ensayos planeados para la obtención de los factores de respuestas, con los que se inicia el análisis estadístico de varianza, desviación estándar y señales de ruido, seguido de una interpretación y unas conclusiones.

7.2.4. Dosificación de Materiales

Como parte de la planeación de diseño de experimentos y con el fin de aprovechar unas de las mayores ventajas de la implementación de diseño DOE, se reduce el tiempo del proceso mediante la disminución de la cantidad de muestras, donde inicialmente se estimaban 100 briquetas ahora solo se realizarán 54 briquetas con la elaboración de un arreglo ortogonal (AO) L9. Este arreglo toma como variable

los factores de control con cada uno de sus niveles, los cuales fueron mencionados en el apartado anterior, así, genera una matriz donde se distribuyen los valores establecido en los niveles y se crean nueve diseños. La matriz equivalente a un arreglo ortogonal L9, se presenta en la **Tabla 17**

Tabla 17. Arreglo L9(3⁴⁻²)

N corridas	Número de Columnas			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	4	1
6	2	3	2	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Fuente: (Gutierrez Pulido, y otros, 2012)

Mediante el uso del software MINITAB, se obtiene la matriz final. Siendo un proceso interno de reemplazar datos de la **Tabla 18**. Contenido de Betún-Fibras-Cal hidratada. con los valores seleccionados en la planeación del diseño de experimentos. La dosificación de los diseños se puede evidenciar en la tabla

Tabla 18. Contenido de Betún-Fibras-Cal hidratada.

Diseño	Contenido Betún (%)	Contenido Betún (g)	Contenido Fibras (%)	Contenido Fibras (g)	Contenido-Cal hidratada (%)	Contenido-Cal hidratada(g)
1	4.60	48.20	0.00	0.00	0.00	0.00
2	4.60	48.20	0.04	0.42	1.50	15.00
3	4.60	48.20	0.08	0.84	3.00	30.00
4	4.90	51.50	0.00	0.00	1.50	15.00
5	4.90	51.50	0.04	0.42	3.00	30.00
6	4.90	51.50	0.08	0.84	0.00	0.00
7	5.20	54.80	0.00	0.00	3.00	30.00

8	5.20	54.80	0.04	0.42	0.00	0.00
9	5.20	54.80	0.08	0.84	1.50	15.00

Fuente: Docente externo Carlos Slebi.

La cal hidratada debe sustituirse del filler, siempre completando los 50 gramos establecidos en la granulometría de la

Tabla 14

7.2.5. Confección de probetas

De cada uno de los diseños planteados en la **Tabla 18** se confeccionan seis réplicas, donde tres se fallarán en condición Seca y las tres restantes en condición húmeda, el tamaño de los especímenes es de 102 mm de diámetro y 63,5mm de altura. La denominación de la probeta se hace de acuerdo con el número de diseño, seguido de la condición en la que se encuentra y finalmente el número de réplica, Por ejemplo, la réplica 3 del diseño 1 húmedo se denominará como **1H3**.

- **Tamizado:** Conociendo la dosificación dada en la
- **Tabla 14** se inicia con el proceso de tamizado de los agregados pétreos que previamente fueron lavados y secados en horno. Se implementaron 7 tamices y el fondo como se evidencia en la **Figura.12**

Figura.12 Organización de Tamices.



Fuente: Jenny Romano.

- **Dosificación:** De acuerdo con la dosificación establecida en la **Tabla 18** se empieza a armar cada uno de los diseños, teniendo especial cuidado en la medida de la cal hidratada, pues esta se remplaza por filler. Por ejemplo, el diseño 7, que cuenta con 30g de cal hidratada contará con solo 20 g de filler completando así los 50g inicialmente establecido en la
- **Tabla 14.**

Figura. 14 Medida de Cal Hidratada del diseño 7

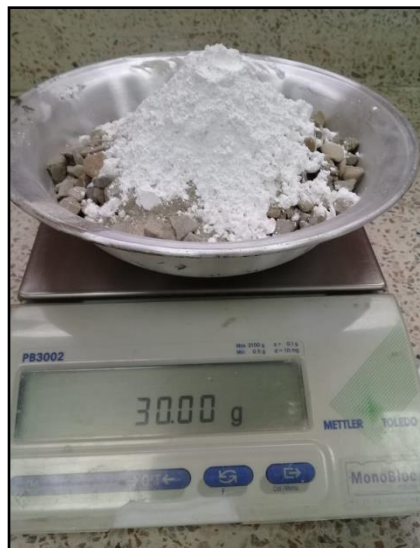


Figura. 13 Preparación granulometría del diseño.



Fuente: Nicolás Rodríguez

La técnica de adición de polímeros se hace vía seca ya que se adiciona como parte del agregado pétreo. Por otra parte, las fibras vienen agrupadas y es necesario

desmenuzarlas de manera que logren estar distribuidas homogéneamente en la mezcla asfáltica.

Figura. 15. Medida de Fibras de Nailon.



Fuente: Nicolás Rodríguez

El ultimo paso en la dosificación es agregar el ligante convencional 60/70, previamente caracterizado para la garantizar de la fabricación de la mezcla asfáltica porosa.

Figura. 16 Adición de Ligante a la dosificación de agregados pétreos.



Fuente: Jenny Romano

- **Mezclado:** Con la dosificación lista se inicia a combinar de manera homogénea cada uno de los materiales presentes en la mezcla asfáltica, la cal hidratada en particular genera un tipo de película que dificulta el proceso, sin embargo, se consigue una mezcla uniforme como se evidencia en la **Figura. 17** Proceso de Mezclado. , lista para moldar.

Figura. 17 Proceso de Mezclado.



Fuente: Jenny Romano

Para el cemento asfáltico 60/70 se define una temperatura de mezclado de 140°C, esta se debe verificar de manera constante durante el proceso (ver **Figura. 18**) para asegurar que el ligante no pierda sus propiedades.

Figura. 18 Revisión de Temperatura de Mezclado.



Fuente: Jenny Romano

- **Compactación:** Para este proceso es necesario dejar reposar la mezcla un tiempo determinado hasta tener una temperatura de 10°C por debajo de la temperatura de Mezclado, seguido de esto se engrasa el molde para iniciar la compactación. Este proceso se realizó mediante una compactadora giratoria simulando las condiciones de campo y se programa con una presión constante de 400 KPa equivalente a los 50 golpes por cada cara que se harían mediante la compactadora de impactos.

Figura. 19 Vertimiento de Mezcla al Molde



Fuente: Jenny Romano

La máquina compactadora giratoria posee un software donde se introduce datos del porcentaje de betún, masa de espécimen (1000g), el diámetro del molde y la presión acorde a la densidad.

- **Desencofrado y briquetas fabricadas:** Inmediatamente de la compactación se deja reposar la mezcla para su posterior desencofrado, en este proceso minucioso, se retira la base del molde y con una ligera presión se desprende la briketa del molde.

El procedimiento desde mezclado hasta el desencofrado se repite para cada uno de los 9 diseños y para cada una de las 6 réplicas por diseño.

7.3. ETIQUETA DE PROBETAS

A medida que se iban fabricando cada uno de los diseños se denominaban con el número del diseño y con una “H” se identificaban las briquetas que serían sometidas a una condición húmeda.

Figura. 20. Etiquetas Probetas Diseños 1-2-3



Fuente: Rodríguez-Romano.

Tabla 19 Dosificación Diseños 1-2-3

Diseño	Contenido Betún (g)	Contenido Fibras (g)	Contenido-Cal hidratada(g)
1	48.2	0.00	00
2	48.2	0.42	15
3	48.2	0.84	30

Fuente: Rodríguez-Romano

Se continua con los diseños 4,5 y 6, los cuales tiene un contenido de betún de 51.5 g.

Figura. 21 Etiqueta Probetas diseños 4-5-6



Fuente: Rodríguez-Romano

Tabla 20 Dosificación Diseños 4-5-6

Diseño	Contenido Betún (g)	Contenido Fibras (g)	Contenido-Cal hidratada(g)
4	51.5	0	15
5	51.5	0.42	30
6	51.5	0.84	0

Fuente: Asesor Carlos Slebi

Finalmente se realizan los tres últimos diseños, diseños 7,8 y 9. Los cuales poseen el contenido de betún más alto, de 54.8g.

Figura. 22 Etiqueta Probetas diseños 7-8-9

Fuente: Rodríguez-Romano

Tabla 21 Dosificación Diseños 7-8-9

Diseño	Contenido Betún (g)	Contenido Fibras (g)	Contenido-Cal hidratada(g)
7	54.8	0.00	30
8	54.8	0.42	00
9	54.8	0.84	15

Fuente: Asesor Carlos Slebi

7.4. ENSAYOS REALIZADOS SOBRE LAS BRIQUETAS

Inicia la fase de ensayos sobre las 54 briquetas fabricadas. De acuerdo con el alcance se realizan 4 ensayos, Cántabro tanto en condición seca como Húmeda (INV.E 760-13), Porcentajes de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas (INV.E 736-13), permeabilidad (Adaptación de INV E 796-13) y Ecurrimiento. Este último se realiza solo como un ensayo de control, mas no de resultados.

7.4.1. Caracterización de las mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste (INV.E-760-13, EN 12697 – 17 y NLT 362/92)

Debido a que la norma Invias no hace la distinción de cántabro en condiciones Secas y húmedas, se toma la normativa española **UNE – EN 12697-17**, para determinar el desgaste de cada una de las Briquetas. Este ensayo inicia con el registro de la masa inicial y el promedio de alturas de cada una de las briquetas.

Seguido, se tomarán las 3 réplicas de cada uno de los diseños destinadas para el cántabro seco, las cuales para nuestro entendimiento se denominarán con la letra S y con la letra H para realizar el cántabro Húmedo. La briqueta se ubica en el tambor de la Maquina de los ángeles la cual realiza 300 vueltas a 33 rpm equivalente en tiempo de 9.9 minutos y después del ensayo se toma registro del peso final. Sin embargo, en vez de tomar un solo dato de masa final, se adapta el ensayo realizando 4 pausas, en las cuales se toma el peso de la briqueta para 50,100,200 y 300 vueltas para obtener una gráfica entre porcentaje de pérdidas vs Numero de vueltas

Figura. 23 Peso Probeta después de ensayo Cántabro.



Fuente: Rodríguez-Romano

Para las briquetas húmedas se realiza el mismo procedimiento, pero adicional a esto, previamente se debieron sumergir 24 horas a un baño de maría en la maquina HUMBOLDT a una temperatura de 60°C, las briquetas sólo se introducen al baño de maría cuando este tenga la temperatura ya mencionada.

Figura. 24 Probetas en Baño de maría a 60°C



Fuente: Laboratorista Hugo Quintana

Después de transcurridas las 23 horas, la temperatura se debe bajar a 25°C, después de transcurrida la ultima hora se procede a sacar las briquetas y dejar secar durante las siguientes 24 horas se toma la masa, para posteriormente realizar el ensayo de cántabro con la adaptación que se explicó anteriormente.

Figura. 26 (a) Verificación de temperatura para sacar probetas



Figura. 25 (b) Probetas después de 24 h sumergidas



Fuente: Laboratorista Hugo Quintana

Finalmente, con los datos registrados, se procede a hallar el porcentaje de desgaste mediante la ecuación (8)

$$P = \frac{P1 - P2}{P1} * 100 \quad (8)$$

Donde:

P: Valor de pérdida por desgaste de la probeta, %

P1: Masa inicial de la probeta, g

P2: Masa Final de la probeta, g

7.4.2. Porcentajes de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas (INV.E 736-13)

Este ensayo solo se realiza a la replicas denominadas con la letra H de cada Diseño. En primera instancia toman las medidas de altura promedio, diámetro y masa seca de la briqueta, con el fin de hallar la densidad aparente.

Las briquetas se sumergen por un lapso de 20-30 minutos, en los cuales se van girando las probetas y con un martillo de goma se golpean ligeramente para eliminar los vacíos de aire y quede lo más saturada posible.

Figura. 27 Probeta en proceso de Saturación.



Fuente: Rodríguez-Romano

Luego en un recipiente se coloca la canastilla que esta conecta a la balanza y se toma el peso sumergido.

Figura. 28 Medición Masa Probeta Sumergida



Fuente: Rodríguez-Romano

7.4.3. Permeabilidad

Este ensayo trata de la medición en que tarda en pasar un volumen de agua a través de la probeta mediante el permeámetro de carga variable, el ensayo es adaptado ya que este, está diseñado para realizarlo in situ. Como primer paso se ubica la briqueta en un molde con el fin de que el fluido no drene por los laterales, para mayor compresión se ajusta un caucho (lo amarillo que se alcanza a observar en la **Figura. 29**) alrededor de la probeta.

Figura. 30 Montaje permeámetro.



Figura. 29 Montaje probeta en Molde.



Fuente: Rodríguez-Romano

Luego se coloca una placa con la cual se podrá apoyar posteriormente el permeámetro LCS, después de realizado el montaje se realiza el ensayo, que consta de llenar el permeámetro por encima de la marca superior, desprender el tapón y tomar 2 tiempos por briqueta en que tarde en drenar el agua desde la marca Superior hasta la marca inferior.

Figura. 31 Permeámetro con Agua



Fuente: Rodríguez-Romano

Con el tiempo registrado se determina el coeficiente de permeabilidad con la ecuación (9) y el contenido de vacíos con aire mediante la ecuación (10). Sin embargo, al adaptar el ensayo LCS, se toma la ecuación (11) equivalente a la ley de Darcy

$$\ln K = 7.624 - 1.348T \quad (9)$$

$$V_a = \frac{58.6}{T^{0.305}} * 100 \quad (10)$$

$$k = \frac{a * L * \ln\left(\frac{h1}{h2}\right)}{A * T} \quad (11)$$

Donde:

K: coeficiente de permeabilidad, cm/s*10⁻²

T: Tiempo de Evacuación del agua, s.

Va: Contenido de vacío con aire, %

a: Área interna

A: Área Probeta

h1: Altura Franja Verde

h2: Altura Franja Roja

7.4.4. Escurrimiento

La norma colombiana invias describe el ensayo en INV.E 825-13, sin embargo, en esta norma describen el procedimiento mediante el uso de una canastilla la cual posee unas perforaciones con dimensiones ya establecidas. La Universidad no contaba con este equipo, por lo cual se trabajó con la normativa UNE -EN 12697-18 en la que establece el método Schellenberg.

Figura. 33 Medición Masa de Baker



Figura. 32 Medición Baker+ Mezcla



Fuente: Rodríguez-Romano

El método consiste en tomar el peso inicial de un Baker limpio (W1), seguido se toma un 1kg de mezcla asfáltica y vierte en el Baker (w2) para posteriormente llevar la muestra a un horno durante 60 minutos a una temperatura aumentada de mezclado de 15°C.

Transcurrido los 60 minutos se retira el vaso y se vuelca durante 10 segundo, finalmente se toma el peso del Baker con el residuo de ligante que pudo haber quedado.

Figura. 35 Baker invertido



Figura. 34 Resultado Final
Ensayo Ecurrimiento.



Fuente: Rodríguez-Romano

El cálculo del ligante escurrido se calcula con la ecuación (12)

$$D = \frac{w3 - w1}{w2 - w1} * 100 \quad (12)$$

Donde:

W1: Masa del Baker Vacío

W2: Masa de Baker+ Masa de Mezcla

W3: Masa Baker + Material retenido después de volcarlo

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

8.1. ENSAYOS DE CRACTERIZACIÓN

Para los 3 ensayos de caracterización realizados sobre los agregados gruesos, se observan valores favorables que cumplen con los porcentajes mínimos establecidos en el art 453 del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) consignados en la **Tabla 5** y para el Art 512 del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) consignado **Tabla 6**. La evaluación de la gravedad específica y la absorción son relevantes debido a que con estos resultados se obtendrán los valores de vacíos totales e interconectados relevantes y discutidos en el siguiente apartado.

Tabla 22. Resultados ensayo Gravedad específica y Absorción

Gravedad Especifica grava INV 223-13				
Masa seca(g)	Masa sumergida(g)	Masa(sss)(g)	Gravedad Especifica	Absorción
3180.5	1939.7	3232.8	2.46	1.64

Fuente: Rodríguez-Romano

El porcentaje de caras fracturadas obtenidos y registrados en la **Tabla 23** supera los valores de 70 y 85% para la norma invias, y los valores de 75% mínimo en a la normativa IDU, evidenciando que es un material óptimo para la implementación de vías con transito T4 y T5 equivalente también a un tránsito NT2-NT3. Adicionalmente con el resultado obtenido el agregado logra garantizar en cierta medida mayor estabilidad que uno con partículas redondeadas

Tabla 23. Resultado ensayo Porcentaje de Caras Fracturadas

Porcentaje de caras fracturadas INV 227-13				
Tamaño Máximo	Peso Muestra (g)	Peso Fracturadas(g)	Peso No Fracturadas(g)	Porcentaje De Caras Fracturadas (%)
3/4"	1500	1349.2	151.6	89.9
1/2"	500	462.8	37.7	92.5
3/8"	200	173.6	26.4	86.8

Fuente: Rodríguez-Romano

El porcentaje de desgaste es otro de los valores a evaluar debido a los inconvenientes típicos de las mezclas porosas, de acuerdo con el ensayo se

obtuvieron los resultados que se pueden observar en la, donde en este caso en particular no cumple con los criterios de ninguna de las normativas, pues supera los valores máximos de 25% y 30% que allí establecen. Así pues, este podría ser un factor que influya en el comportamiento de la mezcla asfáltica.

Tabla 24. Resultados del ensayo de Desgaste.

Porcentaje de Desgaste INV. 218-13 y 219-13							
Granulometría(mm)	Peso(g)	Método	Numero esferas (un)	Numero revoluciones (un)	Peso Inicial(g)	Peso final(g)	Desgaste (%)
19.5	1250	A	12	500	5000	3398	32.04
12.5	1250						
9.5	1250						
6.3	1250						

Fuente: Rodríguez-Romano

Al igual que los ensayos realizados sobre los agregados gruesos, los resultados de los agregados finos se comparan con lo establecido en la norma. Tanto la gravedad específica como la absorción de la arena (ver **Tabla 25**) tienen gran representación en los ensayos de vacíos interconectados y totales

Tabla 25. Resultados Gravedad específica en finos.

Gravedad Especifica arena y Absorción INV 222-13						
Peso Picnómetro (g)	Peso Picnómetro + Agua+ Suelo(g)	Peso Picnómetro + Agua(g)	Peso Arena seca(g)	Peso arena(sss) (g)	Gravedad Especifica	Absorción
154.46	961.5	653.7	490.2	500.4	2.55	2.08

Fuente: Romano- Rodríguez

El promedio de equivalente de arena consignado en la **Tabla 26** se evidencia que supera el valor establecido min por norma del 50% lo que evidencia que hay un contenido de arena y arcilla mayor a la deseada la cual en contacto con el agua trae consigo daños al pavimento.

Tabla 26. Resultados Ensayo Equivalente de Arena

Equivalente de arena INV. 133-13			
Ensayo	Lectura Arcilla	Lectura arena	E. A.
1	4.7	3.8	81
2	4.5	3.9	87
3	4.5	3.9	87
Promedio Equivalente de arena			85

Fuente: Rodríguez- Romano

8.2. ENSAYOS DE ESTABILIDAD, FUNCIONALIDAD Y COMPORTAMIENTO MECÁNICO

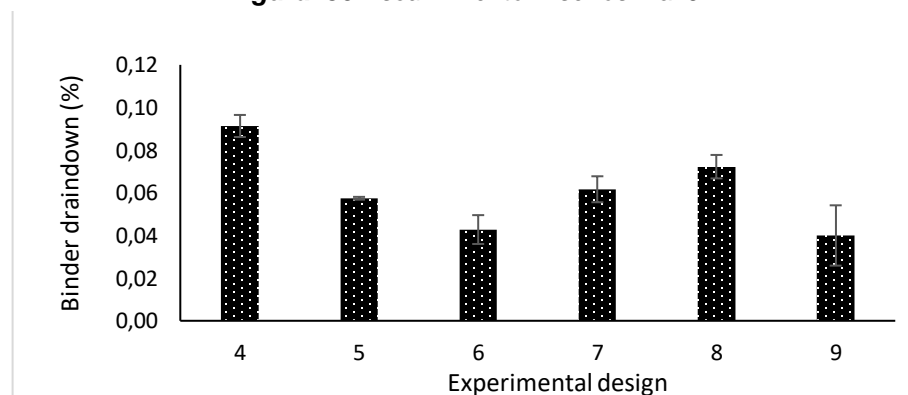
Como se dijo anteriormente en la sección 7.2.4 se implementó un arreglo ortogonal L9, para el cual se evaluaron dentro del plan experimental distintos criterios en términos de funcionalidad, mecánicos y de estabilidad, en la **Tabla 16** se compendia el resumen de los ensayos que se llevó a cabo.

Para el respectivo análisis de los datos se revisó la normalidad por medio del ensayo Anderson-Darling y la homogeneidad de varianza de estos a través del ensayo Levene's test haciendo mediante el software MINI-TAB. Posteriormente se puso en práctica las pruebas paramétricas tales como 2 sample-t-test y el ensayo comparación Tukey test. Lo anterior, debido a que todos los ensayos estuvieron normalmente distribuidos y presentaron homogeneidad de varianza. De la misma manera, se construyeron gráficos de los principales efectos medios y señales ruido, para medir el rango de importancia que tiene la variable en cada una de las respuestas experimentales según lo sugerido en la metodología Taguchi. Finalmente se analizó la tendencia de los datos y se propuso un modelo matemático que explicara de mejor manera el comportamiento.

8.2.1. Respuesta de estabilidad: Esguerrimiento.

Inicialmente la estabilidad se verificó con el ensayo Schlenker previamente descrito en el apartado de metodología. Debido a que las mezclas asfálticas no presentan notables problemas de esguerrimiento, no se tomó como una variable de respuesta significativa. Los valores máximos que puede tener una mezcla drenante en este ensayo son de 0.30% (Lyons y Putman 2013). Se determina que no hay valores de esguerrimiento representativos en ninguno de los ensayos con porcentajes de ligante de 4.90% y 5.20% como se evidencia en **Figura. 36** Para los diseños 1, 2 y 3 no es necesario realizar este ensayo por el bajo porcentaje de esguerrimiento en los diseños con mayor contenido de asfalto.

Figura. 36 Esguerrimiento Diseños 4 al 9

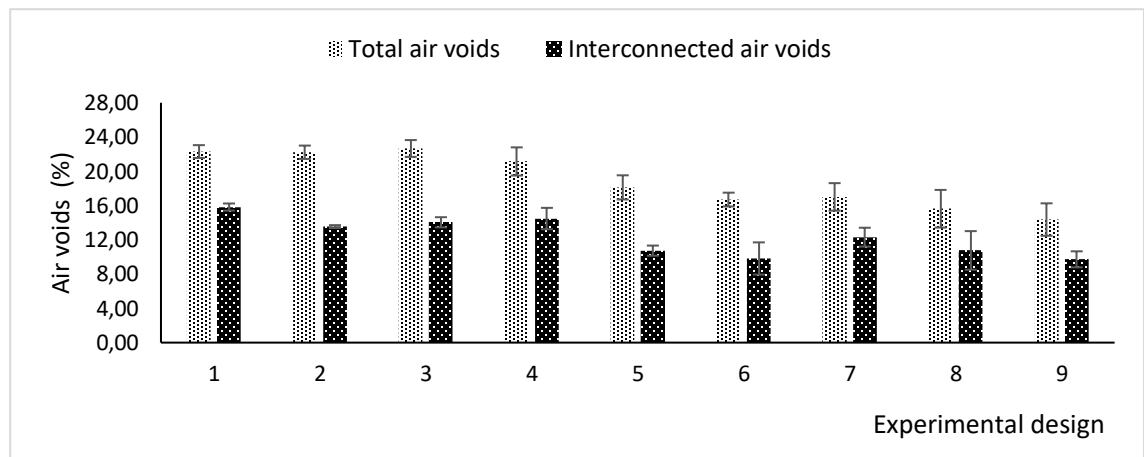


Fuente: Slebi-Rodríguez- Romano

8.2.2. Respuesta de funcionalidad: Vacíos de aire totales, Vacíos interconectados y permeabilidad.

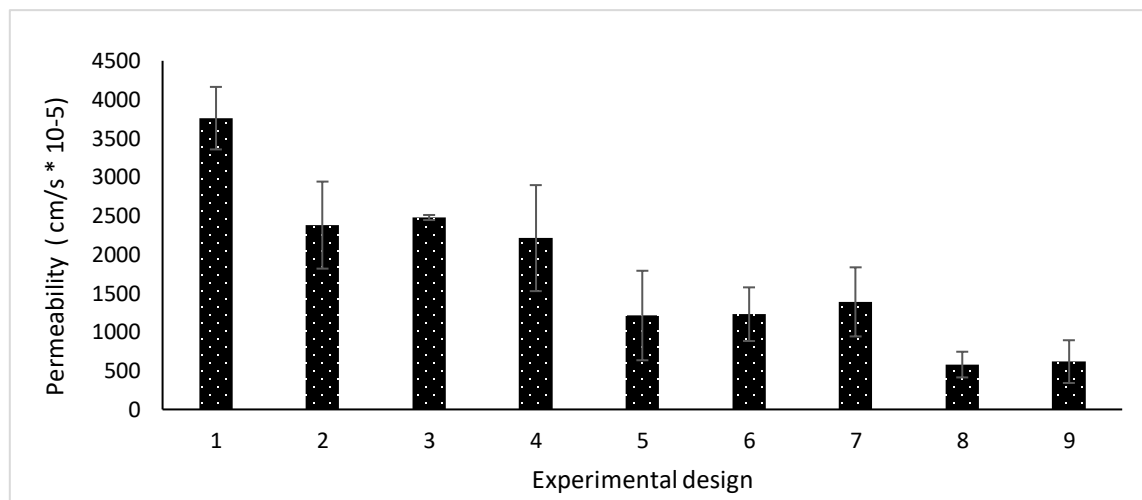
El coeficiente de correlación existente entre los vacíos de aire totales y de vacíos interconectado es de 0.89, este valor determina una relación directamente proporcional de los datos. A mayor cantidad de vacíos de aire, mayor será el porcentaje de vacíos interconectados como se muestra en la **Figura. 37**. De igual manera con un aumento de huecos totales y en consecuencia de poros interconectados, la permeabilidad de la muestra asciende **Figura. 38**

Figura. 37. Vacíos totales e interconectados



Fuente: Slebi-Rodríguez- Romano

Figura. 38. Permeabilidad



Fuente: Slebi-Rodríguez- Romano

Los grupos arrojados por la prueba Tukey, permiten comprobar que los diseños con porcentajes de ligante de 4.6%, es decir los diseños 1,2 y 3, comparten semejanzas en cuanto el porcentaje de vacíos de aire, interconectados y permeabilidad. Estos diseños mencionados superan el 20% en vacíos de aire totales, evidenciados en la

Tabla 27. El ensayo de vacíos de aire es fundamental para garantizar la funcionalidad de la mezcla, los valores admisibles de vacíos oscilan entre un 18% y 20% (Andrés-Valeri et al. 2018)

Tabla 27 Turkey Test- Vacíos de Aire Totales

Factor	N	Mean	Grouping	
3	6	22.664	A	
1	6	22.303	A	
2	6	22.222	A	
4	6	21.147	A	
5	6	18.120		B
7	6	17.010		B C
6	6	16.697		B C
8	6	15.626		B C
9	6	14.365		C

Fuente: Slebi-Rodríguez-Romano

El diseño 1 posee el valor más alto de permeabilidad, este diseño no se modificó con fibras de nylon ni cal hidratada. Comparando el diseño anteriormente mencionado con los diseños del 4 al 9 los cuales contienen mayores porcentajes de ligante, se evidencia una pérdida permeabilidad hasta un 60% a causa de un cierre de vacíos por el ligante y las fibras; esto indica que el valor adecuado para satisfacer los criterios de funcionalidad para este diseño se acerca al 4.6%, valor similar usado para asfalto convencional en la investigación realizada por Valerio. (Andrés-Valeri et al. 2018); sin embargo, para ligantes modificados los valores superan el 5.00% (Lyons y Putman 2013)

Por otra parte, la adición de fibras de nylon cierra los vacíos ligeramente y consume ligante. El agregar un 0.04% de fibras de nylon en los diseños, genera disminución de vacíos de aire y un efecto mayor en la reducción de la capacidad filtrante del diseño. En general el uso de fibras sacrifica parte de la permeabilidad del diseño, pero es compensada por algún mejoramiento mecánico (Lyons y Putman 2013). El uso de fibras de vidrio y basalto han demostrado una reducción en la permeabilidad. (Tanzadeh et al. 2019)

El uso de cal hidratada tiene poca relevancia en términos de funcionalidad de los diseños. Aumenta ligeramente los vacíos de la mezcla gracias a la alta porosidad que presente de un 60- 70%, mucho más que el material mineral común que se encuentra en un orden de 30% de porosidad (Kakade, Reddy y Reddy 2018) .

los datos obtenidos para cada uno de los criterios de funcionalidad son confiables, el valor de P- value es menor al 0.05 y la bondad de los datos es superior al 80%.

El análisis de varianza realizado demuestra que el modelo que mejor se adecua a los criterios, es lineal, soportados en las ecuaciones (13), (14) y (15).

$$T_{AV}(\%) = 74.46 - 11.22 BC (\%) - 28.10 FC (\%) + 0.35 HLC(\%) \quad (13)$$

$$I_{AV} (\%) = 42.66 - 5.90 BC (\%) - 37.60 FC(\%) + 0.076 HLC (\%) \quad (14)$$

$$k(cm/s * 10^{-5}) = 18767 - 3350 BC (\%) - 12647 FC (\%) - 54 HLC (\%) \quad (15)$$

En la **Tabla 28** se evidencia que para cada criterio de funcionalidad el ligante tiene mayor factor de contribución; sin embargo, la incidencia de las fibras en los vacíos interconectados y permeabilidad aumenta. La adición de fibras con un porcentaje de 0.08% parece aumentar la permeabilidad, este fenómeno puede ser debido a una mayor absorción de ligante por parte de la fibra.

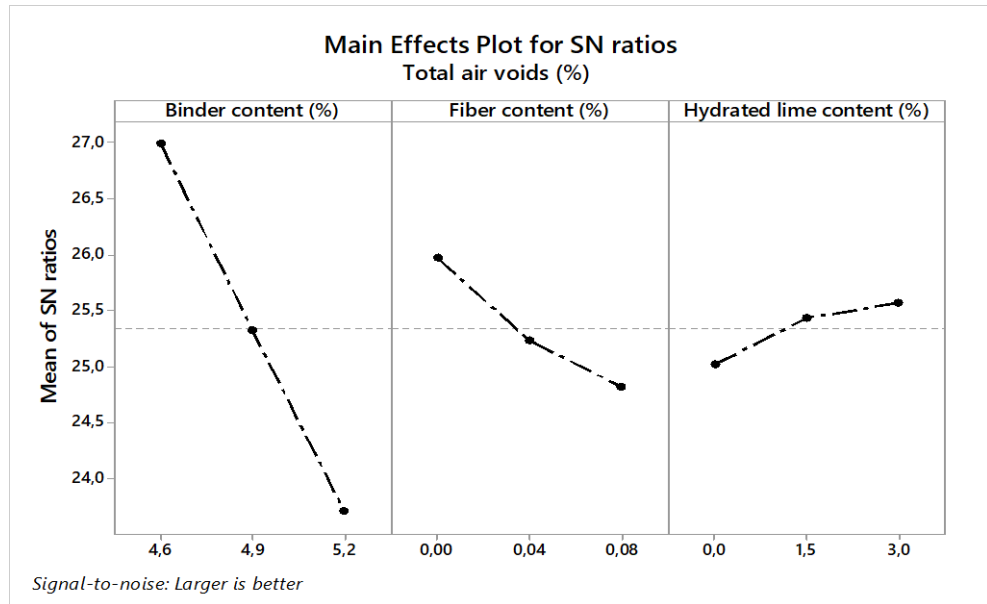
Tabla 28. Análisis de Varianza.

Analysis of Variance			
Source	Air voids(AV)	Interconnected air voids (IAV)	Permeability (k)
Binder content (%)	82.68	47.8	71.160
Fiber content (%)	9.20	34.5	18.020
Hydrated lime (%)	2.04	0.2	0.470
Error	6.08	17.5	10.350
Total	100.00	100.0	100

Fuente: Slebi-Rodríguez- Romano

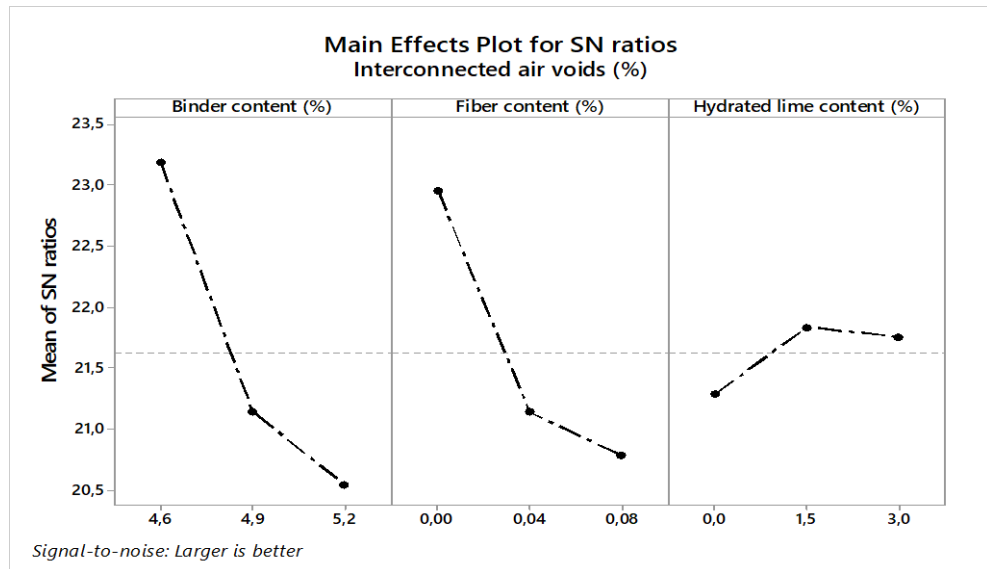
Para garantizar la funcionalidad del diseño, es recomendable mantener valores bajos de contenido de ligante, con una proporción adecuada de fibras. en la **Figura. 39**, la **Figura. 40** y **Figura. 41** se puede comparar la relevancia que tiene cada factor de control, donde se analiza la variable S/N= mientras mas grande mejor, donde el contenido de fibras y de ligante influyen bastante sobre la variación de los vacíos totales, interconectados y la permeabilidad.

Figura. 39 Efectos para las variables S/ N en Vacíos totales



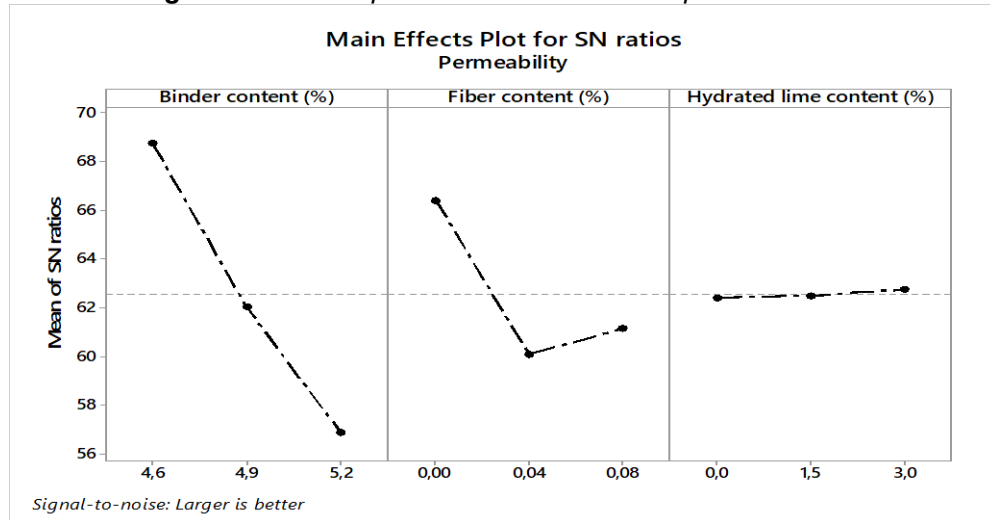
Fuente: Slebi-Rodríguez- Romano

Figura. 40 Efectos para las variables S/N en Vacíos interconectados



Fuente: Slebi-Rodríguez- Romano

Figura. 41 Efectos para las variables S/ N en permeabilidad.



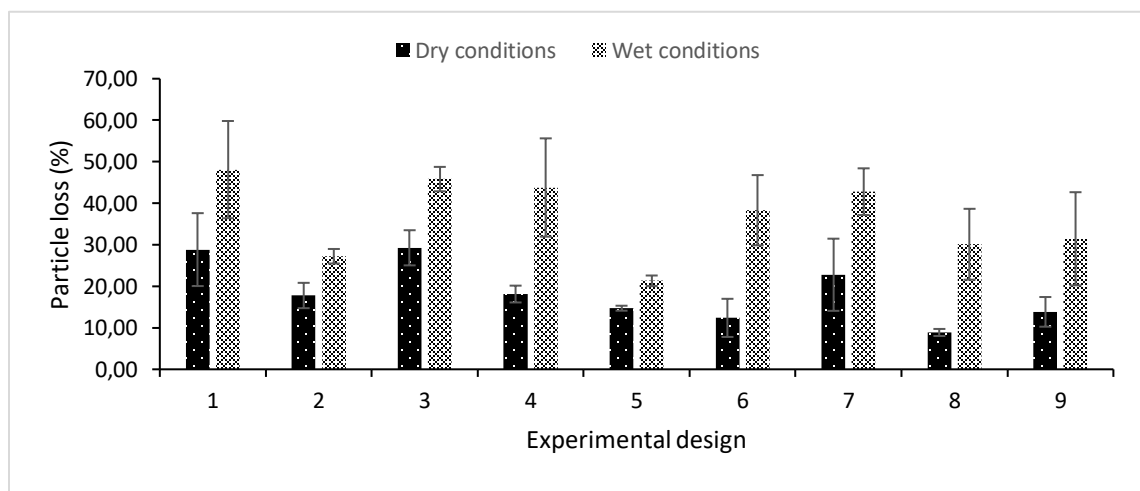
Fuente: Slebi-Rodríguez- Romano

8.2.3. Respuesta de comportamiento mecánico: cántabro en condiciones secas y húmedas.

Los resultados de pérdidas sufrido por cada diseño en condiciones secas y húmedas se presentan en **Figura. 42**. Según los resultados, el uso de fibras de nylon y cal hidratada tuvo efecto positivo en la reducción de pérdidas de partículas en ambas condiciones.

Comparando los valores del diseño 2 y 3 respecto al primer diseño (los cuales presentan el mismo contenido de ligante de 4.6%), indica que con un uso moderado de fibras de nylon en proporción de 0.04% disminuye las perdidas en un 38%, mientras que el exceso de 0.08% de fibras genera mayores pérdidas en 1.5%.

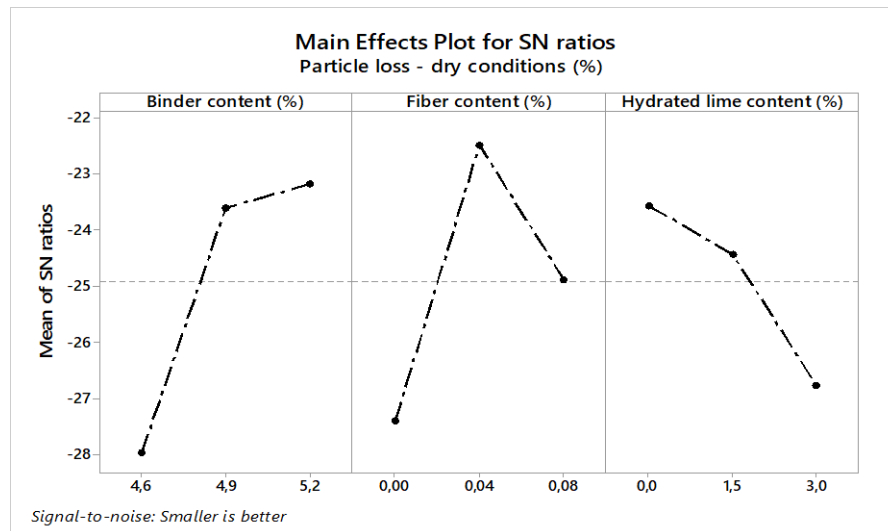
Figura. 42 Porcentaje de pérdidas en condiciones húmedas y secas de cada diseño.



Fuente: Slebi-Rodríguez-Romano

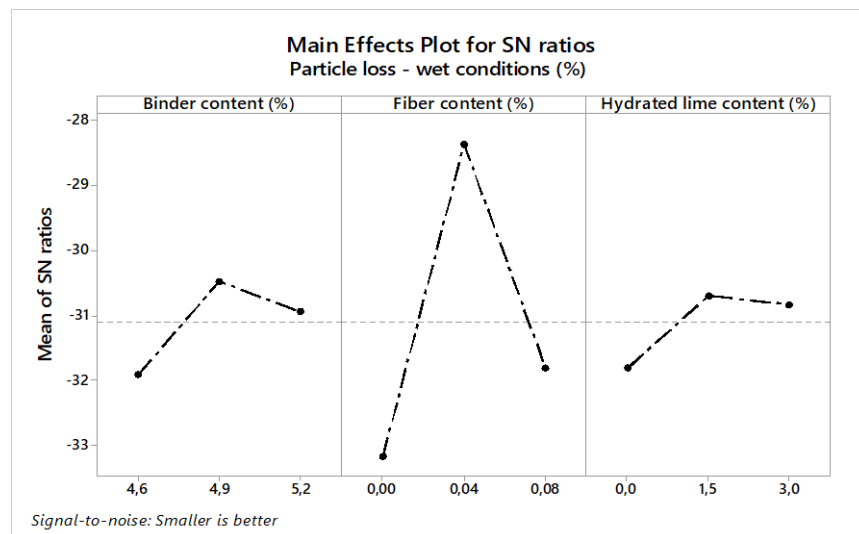
La sensibilidad de la mezcla frente al agua alcanza hasta el doble de pérdidas de partículas en comparación de condiciones secas. Sin embargo, con el uso de cal hidratada genera una mejor adherencia de las partículas debido a sus propiedades anti-stripping (Montejo 2002) . En **Figura. 43** muestra que para la condición seca el uso de 1.5% de cal afecta levemente la perdida de partículas, pero el agregar 3.00% de cal las pérdidas tienen un mayor aumento a pesar de ello la cal hidratada aminora las perdidas en condiciones húmedas. La investigación de Hossam describe que Robert en 1996, recomienda el valor de 1.5 % de cal para mejoras mecánicas. (Hassan y Al-Jabri 2005).

Figura. 43 Efectos para las variables S/ N en condición seca.



Fuente: Slebi-Rodríguez-Romano

Figura. 44 Efectos para las variables S/ N en condición húmeda.



Fuente: Slebi-Rodríguez-Romano

La combinación de factores de control para el criterio mecánico de desgaste ayuda para explicar el comportamiento de los materiales de diseño. La mixtura de cal junto al ligante forma una mejor masilla que cubre el agregado, debido a que la polaridad de la matriz pétreo se ve afectado por la cal lo que hace una mejor adhesión del aglutinante cy el agregado (Tanzadeh et al. 2019) y la adherencia por parte de las fibras con ayuda del ligante, donde las fibras unen grietas y retrasan el desprendimiento (Lee et al. 2005) como se evidencia en la **Figura. 45**.

Figura. 45 Pobreta después del ensayo de cántabro



Fuente: Rodríguez-Romano

El mejor modelo que se ajusta a los datos es lineal multivariado. En las ecuaciones (16) y (17) se evidencia la contribución por cada factor y su combinación.

$$L_{dry} (\%) = 47.1 - 3.85 BC (\%) + 3451 FC (\%) - 122.2 HLC (\%) - 745 BC (\%) FC (\%) + 23.24 BC (\%) HLC (\%) + 180.9 FC (\%) HLC (\%) \quad (16)$$

$$PL_{wet} = -45 + 20.5 BC (\%) + 6370 FC (\%) - 170 HLC (\%) - 1351 BC (\%) FC (\%) + 232 FC (\%) HLC (\%) \quad (17)$$

A continuación se resumen en la **Tabla 29** los resultados obtenidos para la desviación estándar y media para los ensayos de funcionalidad, y en la **Tabla 30** para los ensayos de comportamiento mecánico..

Tabla 29 Resumen resultados de SD y mean -ensayos de funcionalidad

Design	Total air voids		Interconnected air voids		Permeability mm/s	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD
1	22.303	0.746	15.824	0.416	0.329	0.121
2	22.222	0.779	13.544	0.167	0.238	0.056
3	22.664	0.979	14.047	0.592	0.248	0.005
4	21.147	1.646	14.482	1.248	0.221	0.068
5	18.120	1.411	10.736	0.593	0.121	0.058
6	16.697	0.807	9.822	1.880	0.123	0.035
7	17.010	1.606	12.310	1.099	0.139	0.045
8	15.626	2.197	10.764	2.252	0.058	0.017
9	14.365	1.894	9.721	0.937	0.062	0.028

Fuente: Slebi-Rodríguez-Romano

Tabla 30 Resumen resultados de S/N y mean- ensayos de comportamiento mecánico.

Design	Dry conditions		Wet conditions	
	mean	SD	mean	SD
1	28.83	8.78	12.87	14.36
2	17.78	3.05	7.61	8.82
3	29.27	4.23	12.17	14.82
4	18.13	2.03	8.05	8.78
5	14.72	0.60	6.77	7.22
6	12.39	4.59	7.66	4.16
7	22.78	8.69	12.82	8.66
8	8.87	0.85	5.91	4.40
9	13.84	3.57	8.80	11.22

Fuente: Slebi-Rodríguez-Romano

El uso de fibras de nylon represento un mejoramiento en los criterios mecanicos. Los valores optimos de uso son de 0.04%, un aumento de fibras respecto a este valor reprecia un consumo mayor de ligante por consecuencia una reducion significativa de funcionalidad. El exeso de fibras sin suficiente cantidad de ligante representa mayores perdidas de particulas. Con el 1.5 % de cal hidratada se disminuye la sensibilidad al agua del diseño sin comprometer la fucionalidad del mismo. Con la adicion de fibras de nylon y cal hidratada en las proporciones mencionadas, el contenido de ligante optimo de diseño es de 4.9% sin problemas de estabilidad (escurrimiento).

9. CONCLUSIONES

En esta investigación se evaluó el desempeño mecánico y funcional de mezclas asfálticas porosas modificadas con fibras de nylon y cal hidratada. Distintos factores de control denominados, contenido de ligante, contenido de fibras y contenido de cal hidratada fueron tenidos en cuenta. La metodología Taguchi sirvió como base para desarrollar un diseño de experimentos con un arreglo ortogonal L9. Distintas respuestas desde el punto de vista funcional y mecánico fueron llevadas a cabo. A continuación, se presentan los resultados más relevantes de esta investigación.

Los resultados del método Schellennberg mostraron que ninguno de los diseños es susceptible de presentar escurrimiento.

Con respecto a los vacíos totales, la adición de ligante y fibras puede generar una disminución de los vacíos de la mezcla. Por otro lado, la adición de cal hidratada tiende ligeramente a favorecer el contenido de huecos en mezcla.

Al igual que los vacíos totales las respuestas óptimas para vacíos interconectados y permeabilidades son bastante similares, de hecho, existe una correlación directa entre las tres respuestas funcionales, con unos coeficientes de correlación de Pearson de 0.89 entre vacíos totales e interconectados y 0.92 entre interconectados y permeabilidad.

El diseño 5 compuesto por un contenido de betún del 4.90%, un contenido de fibras del 0.04% y un contenido de cal hidratada de 3.00% representa la solución óptima con respecto al desempeño mecánico de la mezcla. Dicho diseño presentó un bajo porcentaje de pérdida de partículas manteniendo buenos niveles de funcionalidad en términos de vacíos totales e interconectados al igual que de permeabilidad.

El contenido de fibras de 0.04% evidencia mejoría ante la abrasión y los criterios mecánicos, sin embargo, a un mayor de contenido de fibras (0.08%), los resultados son inversos, pues provoca mayor remoción de las partículas.

Futuras investigaciones pueden ser llevadas a cabo empleando otro tipo de fibras y otro tipo de aditivos. Se recomienda además el ensayo de tracción indirecta y sensibilidad al agua como otro criterio de respuesta mecánica a ser tenido en cuenta.

10.REFERENCIAS

- AFONSO, M.L., DINIS-ALMEIDA, M. y FAEL, C.S., 2017. Study of the porous asphalt performance with cellulosic fibres. *Construction and Building Materials*, vol. 135, pp. 104-111. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.222.
- AMERI, M. y ABOUTALEBI ESFAHANI, M., 2008. Evaluation and Performance of Hydrated Lime and Limestone Powder in Porous Asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, vol. 9, no. 4, pp. 651-664. ISSN 14680629. DOI 10.3166/rmpd.9.651-664.
- AMERI, M., VAMEGH, M., FARHAD, S., NAENI, C. y MOLAYEM, M., 2018a. Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixtures containing Evonik , Zycotherm and hydrated lime. *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 958-965. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.113.
- AMERI, M., VAMEGH, M., FARHAD, S., NAENI, C. y MOLAYEM, M., 2018b. Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixtures containing Evonik , Zycotherm and hydrated lime. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 165, pp. 958-965. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.113. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.113>.
- ANDRÉS-VALERI, V.C., RODRIGUEZ-TORRES, J., CALZADA-PEREZ, M.A. y RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J., 2018. Exploratory study of porous asphalt mixtures with additions of reclaimed tetra pak material. *Construction and Building Materials*, vol. 160, pp. 233-239. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.067.
- CALES COLOMBIA (CALCO), 2019. Cal Tipo E. .
- CAMPOS, J., 2008. Seguimiento Y Comparación Del Comportamiento De Tramos Con Mezcla Drenante , Según Zona Geográfica Y Condiciones Locales. , pp. 120.
- ESCALANTE VÁSQUEZ, E., 2014. *Diseño y Análisis de Experimentos*. Primero. S.l.: s.n.
- GARCIA, A., TUCK, C., SHOKRI, N., SALEH, E. y ABOUFOUL, M., 2019. Dynamics of water evaporation from porous asphalt. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 202, pp. 406-414. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.043. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.043>.
- GUTIERREZ PULIDO, HUMBERTO; DE LA VARA SALAZAR, R., 2012. *Análisis y diseño de experimentos*. Tercera. Mexico: s.n. ISBN 978-607-15-0725-9.
- HASSAN, H.F. y AL-JABRI, K.S., 2005. Effect of organic fibers on open-graded friction course mixture properties. *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 67-75. ISSN 10298436. DOI 10.1080/10298430500087936.

- IDU, I. urbano de D.U., 2011. *ART. 512-11*. 2011. S.l.: s.n.
- INVIAS, 2013. *Mezcla drenante-art.453-13*. 2013. S.l.: s.n.
- JESÚS, J. De, BALDOVINO, A., LUIS, R., MOREIRA, E.B. y ROSE, J.L., 2019. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering Optimizing the evolution of strength for lime-stabilized rammed soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* [en línea], no. xxxx. ISSN 1674-7755. DOI 10.1016/j.jrmge.2018.10.008. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.10.008>.
- KAKADE, V.B., REDDY, M.A. y REDDY, K.S., 2018. Rutting performance of hydrated lime modified bituminous mixes. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 186, pp. 1-10. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.009. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.009>.
- KRÓL, J.B., KHAN, R. y COLLOP, A.C., 2018. The study of the effect of internal structure on permeability of porous asphalt. *Road Materials and Pavement Design* [en línea], vol. 19, no. 4, pp. 935-951. ISSN 21647402. DOI 10.1080/14680629.2017.1283355. Disponible en: <http://dx.doi.org/14680629.2017.1283355>.
- LEE, S.J., RUST, J.P., HAMOUDA, H., KIM, Y.R. y BORDEN, R.H., 2005. Fatigue Cracking Resistance of Fiber-Reinforced Asphalt Concrete. *Textile Research Journal*, vol. 75, no. 2, pp. 123-128. ISSN 00405175. DOI 10.1177/004051750507500206.
- LESUEUR, D., PETIT, J. y RITTER, H.-J., 2013. The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures : a state - of - the - art review. *Road Materials and Pavement Design*, vol. 14, no. 1, pp. 1-16. ISSN 1468-0629. DOI 10.1080/14680629.2012.743669.
- LITTLE, D.N. y PETERSEN, J.C., 2005. Unique Effects of Hydrated Lime Filler on the Performance- Related Properties of Asphalt Cements: Physical and Chemical Interactions Revisited. , no. April, pp. 207-218.
- LIU, G., WU, S.-P., MO, L.-T., CHEN, Z. y YE, Q.-S., 2006. Influence of fiber types on relevant properties of porous asphalt. *Wuhan Ligong Daxue Xuebao/Journal of Wuhan University of Technology*, vol. 28, no. 6, pp. 3-7. ISSN 16714431.
- LYONS, K.R. y PUTMAN, B.J., 2013. Laboratory evaluation of stabilizing methods for porous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 49, pp. 772-780. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.076. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.076>.
- MEHRARA, A. y KHODAIL, A., 2013. A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 38, no. 424, pp. 423-442. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.033. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.033>.
- MINITAB SUPPORT, 2019. MINI-TAB. .

- MONTEJO, A., 2002. *Ingeniería de Pavimentos*. Universida. S.l.: s.n.
- RANIERI, V., KOWALSKI, K.J., BERLOCO, N., COLONNA, P. y PERRONE, P., 2017. Influence of wax additives on the properties of porous asphalts. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 145, pp. 261-271. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.181. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.181>.
- RONDÓN, H. y REYES, F., 2015. *Pavimentos, materiales construcción y diseño*. Ecoe Edici. Bogotá: s.n.
- RUIZ, A., ALBEROLA, R. y SÁNCHEZ, B., 1990. Porous asphalt mixtures in Spain. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 87-94.
- SAEED, F., RAHMAN, M., CHAMBERLAIN, D. y COLLINS, P., 2019. Asphalt surface damage due to combined action of water and dynamic loading. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 196, pp. 530-538. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.225. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.225>.
- SCHOLZ, M. y GRABOWIECKI, P., 2007. Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, vol. 42, no. 11, pp. 3830-3836. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2006.11.016.
- SLEBI, C.J. y LASTRA, P., 2019. Mechanical performance of fibers in hot mix asphalt: A review. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 200, pp. 756-769. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.171. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.171>.
- TANZADEH, J. y SHAHREZAGAMASAEI, R., 2017. Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nano-silica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 144, pp. 260-270. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.184. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.184>.
- TANZADEH, R., TANZADEH, J., HONARMAND, M. y TAHAMI, S.A., 2019. Experimental study on the effect of basalt and glass fibers on behavior of open-graded friction course asphalt modified with nano-silica. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 212, pp. 467-475. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.010. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.010>.
- TOXEMENT, E.G., 2019. Fibras de Nylon. *Toxement*.
- VAITKUS, A., ANDRIEJAUSKAS, T., VOROBOVAS, V., JAGNIATINSKIS, A. y FIKS, B., 2017. Asphalt wearing course optimization for road traffic noise reduction. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 152, pp. 345-356. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.130. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.130>.
- VAN DER ZWAN, J., GOEMAN, T., GRUIS, H., SWART, J. y OLDENBURGER, R., 1990. Porous Asphalt Wearing Courses in the Netherlands: State of the Art

- Review. *Transportation Research Board*, no. No. 1265, pp. 95-110.
- VAN HEYSTRAETEN, G. y MORAUX, C., 1990. Ten Years' Experience of Porous Asphalt in Belgium . *Transportation Research Record*, vol. 1265, pp. 34-40. ISSN 03611981.
- XIONG, R., FANG, J., XU, A., GUAN, B. y LIU, Z., 2015. Laboratory investigation on the brucite fiber reinforced asphalt binder and asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 83, pp. 44-52. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.089.
- XU, B., LI, M., LIU, S., FANG, J., DING, R. y CAO, D., 2018. Performance analysis of different type preventive maintenance materials for porous asphalt based on high viscosity modified asphalt. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 191, pp. 320-329. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.004. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.004>.